



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Maria João Teles Pereira Alexandre

**Integração de Sistemas Solares na
Reabilitação de um Edifício Escolar para
Atingir os nZEB**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Maria João Teles Pereira Alexandre

**Integração de Sistemas Solares na
Reabilitação de um Edifício Escolar para
Atingir os nZEB**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação da

Doutora Sandra Maria Gomes Monteiro da Silva

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos. Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial

CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Dado por concluído a elaboração desta dissertação, quero prestar o devido reconhecimento e agradecimento a todas as pessoas que colaboraram e apoiaram na sua realização.

À minha orientadora, Professora Doutora Sandra Maria Gomes Monteiro Silva pela sua disponibilidade, pelas orientações e análises críticas construtivas prestadas durante a realização de todo o trabalho.

Ao colega da minha orientadora, Jorge Fernandes, pela disponibilidade prestada no esclarecimento de dúvidas em relação o programa DesignBuilder.

Aos meus amigos, agradeço todo o apoio e amizade prestada durante este percurso, em especial à Ana Peixoto pelo apoio/companheirismo e amizade prestada ao longo destes cinco anos.

Por fim, mas não menos importante, quero manifestar os meus mais sinceros agradecimentos aos meus pais, irmão e ao meu namorado por todo o apoio incondicional demonstrado ao longo do meu percurso académico.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Existe atualmente uma forte preocupação ambiental, associada às mudanças climáticas, principalmente devido às emissões de gases de efeito de estufa, o que leva à necessidade de consumir energia de forma mais eficiente. O setor dos edifícios é responsável por cerca de 40% do consumo total de energia e 36% das emissões de gases de efeito de estufa na Europa.

A reabilitação energética do parque edificado é uma forma de melhorar a eficiência energética dos edifícios. Neste trabalho foram estudadas soluções de reabilitação, visando a melhoria da eficiência energética, de um edifício escolar, bem como verificar se as soluções estudadas são as adequadas para tornar o edifício num nZEB “Nearly Zero Energy Building” (edifício com necessidades quase nulas de energia). Neste sentido, foi selecionada uma escola, que se encontrava em fase de reabilitação, visto ser um edifício com elevados requisitos de conforto e de consumo de energia. Além da análise das soluções de reabilitação implementadas no edifício foi proposta uma solução de reabilitação que convertesse o edifício num nZEB. A análise do desempenho do edifício foi realizada através de simulação dinâmica (usando o DesignBuilder), sendo avaliado o impacto das medidas de reabilitação implementadas no comportamento termo-energético do mesmo, e analisadas as condições de conforto térmico nas salas de aulas de modo a verificar o impacto da reabilitação proposta nas condições de conforto térmico dos alunos.

A análise das condições ambientais do espaço, sem climatização, permitiu verificar que, a implementação da solução de reabilitação no edifício melhorou as condições de conforto térmico de alguns espaços (reduziu as necessidades energéticas 5,2% anualmente, em relação à situação antes da reabilitação). Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, sem sistema de climatização, é possível assegurar as condições de conforto em todos os espaços, no verão, mas, mesmo com sistema de climatização, não são asseguradas as condições de conforto, em todos os espaços, no inverno, devido a perdas por radiação para o envidraçado (anualmente as necessidades energéticas são reduzidas em 74,4% em relação à solução de reabilitação implementada, e 75,7%, em relação à situação antes da reabilitação).

Palavras-Chave: comportamento termo-energético, custos, eficiência energética, nZEB, reabilitação.

ABSTRACT

There is currently a strong environmental concern, associated with climate change, mainly due to greenhouse gas emissions, which leads to the need to consume energy more efficiently. The buildings sector is responsible for around 40% of total energy consumption and 36% of greenhouse gas emissions in Europe.

The energy rehabilitation of the built park is a way to improve the energy efficiency of buildings. In this assignment, rehabilitation solutions were studied, aiming at improving the energy efficiency of a school building, as well as checking if the studied solutions are adequate to turn the building into a nZEB “Nearly Zero Energy Building” (building with almost zero energy needs). In this sense, a school, which was undergoing rehabilitation, was selected, as it is a building with high comfort and energy consumption requirements. In addition to the analysis of the rehabilitation solutions implemented in the building, a rehabilitation solution that would convert the building into an nZEB was proposed. The performance analysis of the building was carried out through dynamic simulation (using DesignBuilder), evaluating the impact of the rehabilitation measures implemented in the thermo-energetic behavior of the building, and the conditions of thermal comfort in the classrooms were also analyzed in order to verify the impact of the proposed rehabilitation on said conditions.

The analysis of the environmental conditions of the space, without air conditioning, allowed to verify that, the implementation of the rehabilitation solution in the building improved the thermal comfort conditions of some spaces (reduced the energy needs 5,2% annually, in relation to the situation before the rehabilitation). After the implementation of the nZEB rehabilitation solution, without a climate control system, it is possible to ensure comfort conditions in all spaces in the summer, but even with a climate control system, comfort conditions are not ensured in all spaces, in winter, due to radiation losses to the glass components in the structure (energy needs are reduced by 74,4% annually compared to the implemented rehabilitation solution, and 75,7% compared to the situation before rehabilitation).

Key-Words: costs, energy efficiency, nZEB, rehabilitation, thermo-energetic behavior.

ÍNDICE GERAL

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Enquadramento.....	1
1.2.	Objetivos	2
1.3.	Estrutura da dissertação	3
2.	ESTADO DE ARTE	4
2.1.	Eficiência energética.....	4
2.2.	Legislação Nacional.....	8
2.3.	nZEB “Nearly Zero Energy Building” e NZEB “Net Zero Energy Building”	9
2.4.	Caracterização de tecnologias e soluções construtivas eficientes	16
2.4.1.	Envolvente dos edifícios	16
2.4.2.	Coberturas	23
2.4.3.	Pavimentos	29
2.4.4.	Vãos envidraçados e Sistemas de sombreamento	30
2.5.	Sistemas de ventilação e climatização.....	33
2.6.	Sistemas de aproveitamento de energia renovável.....	37
2.6.1.	Sistemas de biomassa	38
2.6.2.	Sistemas solares	40
2.6.2.1.	Sistemas solares térmicos	40
2.6.2.2.	Sistemas fotovoltaicos.....	43
2.6.3.	Sistemas eólicos.....	46
2.6.4.	Energia geotérmica.....	48
3.	METODOLOGIA	50
3.1.	Abordagem metodológica	50
3.2.	Caracterização do caso de estudo.....	50

3.2.1.	Descrição do edifício.....	50
3.2.2.	Soluções construtivas - Elementos opacos.....	54
3.2.3.	Envidraçados e portas	60
3.2.4.	Perfis de ocupação, iluminação e equipamentos	60
3.2.5.	Trocas por ventilação.....	62
3.2.6.	Sistemas de aquecimento e arrefecimento	63
3.3.	Desempenho termo-energético	63
3.4.	Conforto térmico dos ocupantes	66
3.5.	Caracterização das soluções de reabilitação.....	68
3.6.	Análise de custos	71
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	72
4.1.	Desempenho térmico do edifício antes de reabilitação - sem sistema AVAC ativo.....	72
4.1.1.	Desempenho térmico da zona do jardim de infância.....	73
4.1.2.	Desempenho térmico da zona do ensino básico – 1º ciclo.....	79
4.2.	Desempenho termo-energético do edifício antes de reabilitação - com sistema AVAC ativo..	86
4.2.1.	Desempenho termo-energético da zona do Jardim de Infância.....	87
4.2.1.1.	Desempenho térmico da zona do jardim de infância.....	87
4.2.1.2.	Necessidades de aquecimento e arrefecimento da zona do jardim de infância	94
4.2.2.	Desempenho termo-energético da zona do ensino básico – 1º ciclo.....	96
4.2.2.1.	Desempenho térmico da zona do ensino básico – 1º ciclo.....	96
4.2.2.2.	Necessidades de aquecimento e arrefecimento da zona do ensino básico – 1º ciclo .	104
4.2.3.	Necessidade de aquecimento e arrefecimento do edifício	105
4.3.	Desempenho térmico da solução de reabilitação implementada para o edifício – sem sistema AVAC ativo.....	106
4.3.1.	Desempenho térmico da zona do ensino básico – 1º ciclo.....	106

4.4.	Desempenho termo-energético da solução de reabilitação implementada para o edifício – com sistema AVAC ativo.....	114
4.4.1.	Desempenho termo-energético da zona do ensino básico – 1º ciclo.....	115
4.4.1.1.	Desempenho térmico da zona do ensino básico – 1º ciclo.....	115
4.4.1.2.	Necessidades de aquecimento e arrefecimento da zona do ensino básico – 1º ciclo .	124
4.4.2.	Necessidade de aquecimento e arrefecimento do edifício	125
4.5.	Desempenho térmico do edifício com a implementação da solução de reabilitação nZEB – sem sistema AVAC ativo.....	127
4.5.1.	Desempenho térmico da zona do jardim de infância.....	127
4.5.2.	Desempenho térmico da zona do ensino básico – 1º ciclo.....	134
4.6.	Desempenho termo-energético da solução de reabilitação nZEB – com sistema AVAC ativo	144
4.6.1.	Desempenho termo-energético da zona do jardim de infância.....	144
4.6.1.1.	Desempenho térmico da zona do jardim de infância.....	144
4.6.1.2.	Necessidades de aquecimento e arrefecimento da zona do jardim de infância	152
4.6.2.	Desempenho termo-energético da zona do ensino básico – 1º ciclo.....	154
4.6.2.1.	Desempenho térmico da zona do ensino básico – 1º ciclo.....	154
4.6.2.2.	Necessidade de aquecimento e arrefecimento da zona do ensino básico – 1º ciclo...	165
4.6.3.	Necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício	166
4.6.4.	Necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício com integração de painéis fotovoltaicos	168
4.7.	Custos	170
5.	CONCLUSÃO.....	172
5.1.	Limitações e desenvolvimentos futuros	174
	ANEXOS	185

SIGLAS E ACRÓNIMOS

BPIE – Instituto de Desempenho de Edifícios da Europa, The Buildings Performance Institute Europe

CFCs - Clorofluorcarbonetos

CO₂- Dióxido de Carbono

COP - Coeficiente de Desempenho

EER - Índice de Eficiência de Energia

EM - Estados Membros

ENU - Espaços interiores não úteis

EPBD - Diretiva de Desempenho Energético nos Edifícios, Energy Performance in Buildings Directive

EPS - Poliestireno expandido

ETICS - Sistemas compostos de isolamento térmico externo

GPL - Gás de Petróleo Liquefeito

HCFCs - Hidroclorofluorcarbonos

ICB - Aglomerado de cortiça expandida

LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia

MW e/ou LM - Lã mineral

nZEBs - Edifícios com quase Zero Energia, Nearly Zero Energy Buildings

NZEBs - Edifícios líquidos de Energia Zero, Net Zero Energy Buildings

RESP - Rede Elétrica de Serviço Público

PVC - Policloreto de vinil

Si - Silício

TR - Toneladas de refrigeração

UE - União Europeia

UPAC - Unidades de Produção para Autoconsumo

UPP - Unidade de pequena produção

XPS - Poliestireno extrudido

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Princípios base do conceito de nZEB	11
Figura 2 - Pormenor construtivo de um sistema ETICS	18
Figura 3 - Pormenor construtivo de uma fachada ventilada (esquerda); esquema do fluxo de ar numa fachada ventilada (direita)	20
Figura 4 - Fachada ajardinada: sistema tipo trepadeira (esquerda); sistema tipo modular (direita)	21
Figura 5 - Museu Quai Brandly em Paris, França	22
Figura 6 - Cobertura inclinada com isolamento na empena	25
Figura 7 - Cobertura inclinada com isolamento na esteira	26
Figura 8 - Pormenor construtivo tipo de uma cobertura plana tradicional	26
Figura 9 - Pormenor construtivo tipo de uma cobertura plana invertida	27
Figura 10 - Pormenor construtivo tipo de uma cobertura ajardinada	28
Figura 11 - Pormenor construtivo tipo de um pavimento com isolamento térmico na face inferior de laje	29
Figura 12 - Pormenor construtivo tipo de um pavimento com isolamento térmico na face superior de laje	30
Figura 13 - Soluções de janelas instaladas em Portugal	31
Figura 14 - Representação esquemática do fator solar dos vidros	31
Figura 15 - Edifício Bloco Carnide localizado em Lisboa	33
Figura 16 - Estação ferroviária Aveiro	33
Figura 17 - Sistema centralizado: “self-containg”	36

Figura 18 - Sistema descentralizado: “multi-split”	36
Figura 19 - Sistema solar térmico do tipo termossifão.....	41
Figura 20 - Sistema solar térmico do tipo circulação forçada	42
Figura 21 - Edifício residencial na suíça com sistema solar térmico na cobertura (esquerda); edifício com sistema solar térmico na fachada (direita)	43
Figura 22 - Célula de silício monocristalino (esquerda); célula de silício policristalino (centro); célula de silício amorfo (direita)	44
Figura 23 - Unidades de Pequena Produção (UPP) (esquerda); Unidades de Produção de Autoconsumo (UPAC) (direita)	45
Figura 24 - Telha fotovoltaica (esquerda); cobertura de varanda (direita)	46
Figura 25 - Vista geral da fachada sul do Edifício Solar XXI	46
Figura 26 - Sistemas eólicos: sistema de eixo vertical (esquerda); sistema de eixo horizontal (direita) .	47
Figura 27 - Sistema PowerWindow; Protótipo TURBan V2.0 de 2.0 kW.....	48
Figura 28 - Captação horizontal (esquerda); captação vertical (direita)	49
Figura 29 - Planta do piso 0	52
Figura 30 - Planta do piso 1	52
Figura 31 - Pormenor construtivo tipo da cobertura da zona do jardim de infância	54
Figura 32 - Pormenor construtivo tipo da cobertura da zona do ensino básico – 1º ciclo	55
Figura 33 - Pormenor construtivo tipo das paredes exteriores da zona do jardim de infância (esquerda); pormenor construtivo tipo das paredes exteriores e paredes interiores, do tipo I, da zona do ensino básico – 1º ciclo (direita)	55
Figura 34 - Pormenor construtivo tipo das paredes interiores da zona do ensino básico – 1º ciclo (esquerda); pormenor construtivo tipo das paredes interiores do tipo II (direita)	56

Figura 35 - Pormenor construtivo tipo do piso intermédio da zona do ensino básico – 1º ciclo	57
Figura 36 - Pormenor construtivo tipo do piso térreo e das paredes em contacto com o solo do edifício	57
Figura 37 - Modelo geométrico 3D do edifício escolar	64
Figura 38 - Modelo do piso 0 do edifício	65
Figura 39 - Modelo do piso 1 do edifício	66
Figura 40 - Modelo adaptativo de conforto térmico	67
Figura 41 - Método da zona de conforto	68
Figura 42 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais fria no jardim de infância – antes de reabilitação.....	74
Figura 43 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais fria no jardim de infância – antes de reabilitação.....	74
Figura 44 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais frio no jardim de infância – antes de reabilitação.....	75
Figura 45 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais frio no jardim de infância – antes de reabilitação.....	76
Figura 46 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – antes de reabilitação.....	76
Figura 47 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – antes de reabilitação	77
Figura 48 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – antes de reabilitação.....	78
Figura 49 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – antes de reabilitação	78

Figura 50 - Modelo de conforto térmico adaptativo, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do jardim de infância, nas salas de aulas, considerando a situação mais desfavorável	79
Figura 51 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação.....	80
Figura 52 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação.....	81
Figura 53 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação.....	82
Figura 54 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação.....	82
Figura 55 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação	83
Figura 56 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação	84
Figura 57 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação.....	85
Figura 58 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação.....	85
Figura 59 - Modelo de conforto térmico adaptativo, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica P _{1,17} , considerando a situação mais desfavorável	86
Figura 60 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais fria no jardim de infância – antes de reabilitação.....	87
Figura 61 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais fria no jardim de infância – antes de reabilitação.....	88

Figura 62 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais frio no jardim de infância – antes de reabilitação.....	89
Figura 63 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais frio no jardim de infância – antes de reabilitação.....	89
Figura 64 - Método da zona de conforto, para o dia mais frio no período de ocupação da zona do jardim de infância, nas salas de aulas, considerando a situação mais desfavorável.....	90
Figura 65 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – antes de reabilitação.....	91
Figura 66 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – antes de reabilitação	92
Figura 67 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – antes de reabilitação.....	92
Figura 68 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – antes de reabilitação	93
Figura 69 - Método da zona de conforto, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do jardim de infância, nas salas de aulas, considerando a situação mais desfavorável.....	94
Figura 70 - Necessidades de arrefecimento por mês da zona do jardim de infância – sem reabilitação	95
Figura 71 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação.....	96
Figura 72 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação.....	97
Figura 73 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação.....	98

Figura 74 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação	98
Figura 75 - Método da zona de conforto, para o dia mais frio no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica P _{1,17} , considerando a situação mais desfavorável.....	99
Figura 76 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação.....	100
Figura 77 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação	101
Figura 78 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação.....	102
Figura 79 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação	102
Figura 80 - Método da zona de conforto, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas (piso 1 e salas de aulas P _{0,1} e P _{0,2}), sala de aula P _{0,3} e sala de expressão plástica P _{1,17} , considerando a situação mais desfavorável	103
Figura 81 - Necessidades de arrefecimento por mês da zona do ensino básico – 1º ciclo – sem reabilitação.....	104
Figura 82 - Necessidades de arrefecimento por mês do edifício – sem reabilitação.....	105
Figura 83 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação	107
Figura 84 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação	108
Figura 85 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação	109

Figura 86 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação.....	109
Figura 87 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação	110
Figura 88 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação.....	111
Figura 89 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação	112
Figura 90 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação	113
Figura 91 - Modelo de conforto térmico adaptativo, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica P _{1,17} , considerando a situação mais desfavorável	114
Figura 92 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação	115
Figura 93 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação	116
Figura 94 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação	117
Figura 95 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação.....	118
Figura 96 - Método da zona de conforto, para o dia mais frio no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica P _{1,17} , considerando a situação mais desfavorável.....	119

Figura 97 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação	120
Figura 98 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação.....	121
Figura 99 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação	122
Figura 100 - Temperatura operativa dos espaços para o dia quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação	123
Figura 101 - Método da zona de conforto, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas do piso 0 e sala de aula P _{1,10} , na sala de aula P _{1,8} e P _{1,9} , e na sala de expressão plástica P _{1,17} , considerando a situação mais desfavorável	124
Figura 102 - Necessidades de arrefecimento por mês da zona do ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação.....	125
Figura 103 - Necessidade de arrefecimento por mês do edifício – com reabilitação.....	126
Figura 104 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais fria no jardim de infância – solução nZEB	128
Figura 105 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais fria no jardim de infância – solução nZEB	129
Figura 106 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais frio no jardim de infância – solução nZEB	129
Figura 107 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais frio no jardim de infância – solução nZEB	130
Figura 108 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – solução nZEB	131

Figura 109 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – solução nZEB	132
Figura 110 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – solução nZEB	133
Figura 111 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – solução nZEB.....	133
Figura 112 - Modelo de conforto térmico adaptativo, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do jardim de infância, nas salas de aulas, considerando a situação mais desfavorável.....	134
Figura 113 - Temperatura ambiente interior das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB	135
Figura 114 - Temperatura operativa das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB.....	136
Figura 115 - Temperatura ambiente interior das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB	137
Figura 116 - Temperatura operativa das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB.....	139
Figura 117 - Temperatura ambiente interior das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB	140
Figura 118 - Temperatura operativa das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB	141
Figura 119 - Temperatura ambiente interior das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB	142
Figura 120 - Temperatura operativa das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB.....	143

Figura 121 - Modelo de conforto térmico adaptativo, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas (pisos 0 e 1) e na sala de expressão plástica P _{1,17} , considerando a situação mais desfavorável	143
Figura 122 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais fria no jardim de infância – solução nZEB	145
Figura 123 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais fria no jardim de infância – solução nZEB	146
Figura 124 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais frio no jardim de infância – solução nZEB	147
Figura 125 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais frio no jardim de infância – solução nZEB	147
Figura 126 - Método da zona de conforto, para o dia mais frio no período de ocupação da zona do jardim de infância, nas salas de aulas, considerando a situação mais desfavorável.....	148
Figura 127 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – solução nZEB	149
Figura 128 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – solução nZEB	150
Figura 129 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – solução nZEB	151
Figura 130 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – solução nZEB.....	151
Figura 131 - Método da zona de conforto, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do jardim de infância, nas salas de aulas, considerando a situação mais desfavorável.....	152
Figura 132 - Necessidades de arrefecimento por mês da zona do jardim de infância – solução nZEB	153

Figura 133 - Temperatura ambiente interior das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB	155
Figura 134 - Temperatura operativa das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB	155
Figura 135 - Temperatura ambiente interior das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB	157
Figura 136 - Temperatura operativa das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB	158
Figura 137 - Método da zona de conforto, para o dia mais frio no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, considerando a situação mais desfavorável.....	159
Figura 138 - Temperatura ambiente interior das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB	160
Figura 139 - Temperatura operativa das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB	161
Figura 140 - Temperatura ambiente interior das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB	162
Figura 141 - Temperatura operativa das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB.....	163
Figura 142 - Método da zona de conforto, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, considerando a situação mais desfavorável	164
Figura 143 - Necessidades de arrefecimento por mês da zona do ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB	165
Figura 144 - Necessidades de arrefecimento por mês do edifício – solução nZEB	167

Figura 145 - Necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício assegurada pela energia produzida pelos painéis fotovoltaicos – solução nZEB.....	169
Figura 146 – Energia excedente produzida pelos painéis fotovoltaicos - solução nZEB.....	170

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de paredes construídas em Portugal e a percentagem de edifícios por tipo de parede	17
Tabela 2 – Tipos de coberturas inclinadas existentes nos edifícios em Portugal	24
Tabela 3 - Ranking de sustentabilidade.....	38
Tabela 4- Áreas e pé-direito dos compartimentos do edifício	53
Tabela 5 - Características dos materiais constituintes dos elementos construtivos da zona do jardim de infância	58
Tabela 6 - Características dos materiais constituintes dos elementos construtivos da zona do ensino básico – 1º ciclo.....	59
Tabela 7 - Características dos envidraçados e das portas do edifício	60
Tabela 8 - Tipo de espaço e período de utilização correspondente a cada espaço	61
Tabela 9 - Ocupação de cada espaço	62
Tabela 10 - Taxa de renovação de ar por hora dos espaços com ocupação.....	63
Tabela 11 - Características dos materiais constituintes dos elementos construtivos da solução de reabilitação implementada	69
Tabela 13 - Características dos materiais constituintes dos elementos construtivos da solução de reabilitação para atingir um edifício nZEB.....	70
Tabela 14 - Custo total da solução de reabilitação, solução de reabilitação para atingir um edifício nZEB (sistemas passivos e sistemas passivo mais sistemas ativos).....	171

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

O consumo de energia tem verificado um aumento progressivo, principalmente após a revolução industrial do século XIX (Salvador, 2017). A energia tem sido obtida através da queima de matérias-primas tais como a madeira, o carvão, os derivados do petróleo (os mais procurados) e mais recentemente o gás natural (Portal da Construção Sustentável, n.d). O crescimento do consumo energético conduz a um aumento da combustão destas matérias-primas, provocando graves problemas ambientais ao planeta, resultantes da emissão de gases de efeito estufa, nomeadamente o dióxido de carbono (CO₂) (Portal da Construção Sustentável, n.d). A concentração atual de CO₂ na atmosfera é uma real ameaça à estabilidade e equilíbrio do planeta, tornando-se fundamental reduzir os consumos energéticos e promover o consumo de energias alternativas de origem renovável, de modo a reduzir as emissões de gases de efeito de estufa (Salvador, 2017).

O aumento do consumo energético mundial das últimas décadas está relacionado, em grande parte, com o aumento das exigências sociais relativamente à qualidade de vida, sobretudo nos países em desenvolvimento, notando-se um ligeiro abrandamento do consumo nos países mais ricos (Silva, Camargo, Sordi, & Santos, 2003).

O setor dos edifícios é responsável por cerca de 40% do consumo total de energia e 36% das emissões de CO₂ na Europa, logo é um dos setores com mais potencial de poupança energética e na redução da emissão de CO₂ (Diretiva 2012/27/UE, 2012).

A União Europeia (UE) tem vindo a desenvolver um conjunto de políticas que visam aumentar a eficiência energética dos edifícios através da redução dos consumos e a promoção do recurso a fontes de energia de origem renovável, de modo a que se possam atingir, a curto/médio prazo, edifícios com necessidades de energia quase nulas, os nZEBs (*Nearly Zero Energy Buildings*). A implementação destas políticas europeias nos diferentes Estados Membros (EM) permitirá reduzir consideravelmente a dependência energética da UE, sem que isto implique a redução da qualidade de vida dos seus cidadãos, e permitem

igualmente reduzir as emissões de gases de efeito estufa de modo a minimizar os fenómenos associados às alterações climáticas.

Para o cumprimento das metas definidas pela reformulação da EPBD (Energy Performance of Building Directive) (Directiva 2010/31/UE, 2010), Diretiva relativa ao desempenho energético dos edifícios, e as metas da União Europeia para 2020, ou seja, reduzir as emissões de gases com efeitos de estufa em 20%, relativamente aos valores de 1990, aumentar em igual percentagem a proporção de fontes de energia renováveis no consumo de energia final e alcançar a meta de 20% estabelecida para a eficiência energética até 2020, é essencial a instalação de sistemas solares térmicos e fotovoltaicos na reabilitação dos edifícios (Directiva 2010/31/UE, 2010). As metas da UE para 2030, passam por reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em pelo menos 40%, em relação aos valores de 1990, aumentar em pelo menos 27% a proporção de fontes de energia renováveis no consumo de energia final e alcançar a meta de 27% estabelecida para a eficiência energética até 2030 (European Commission, 2013). Para 2050 a EU pretende diminuir as emissões de gases com efeito de estufa, em 80% a 95%, em relação aos valores de 1990 (European Commission, 2013).

Uma vez que a taxa de construção de novos edifícios na Europa é de 1-2% ao ano (COM, 2011), é necessário intervir nos edifícios existentes de modo a ser possível atingir as metas de eficiência energética da UE.

Em Portugal, os edifícios residenciais são responsáveis por 16,4% e o setor dos edifícios de serviços é responsável por 12,2% do consumo total de energia, em 2017, não sendo conhecido, o consumo de energia relativa aos edifícios escolares, que são o objeto do presente estudo (DGEG, 2017).

1.2. Objetivos

Este trabalho visa o estudo termo-energético de soluções de reabilitação (envolvente e sistemas solares) implementadas num edifício escolar, bem como verificar se as soluções estudadas são as adequadas para tornar o edifício num nZEB. Neste sentido, foi escolhida uma escola, que se encontrava em fase de reabilitação, visto ser um edifício com elevados requisitos de conforto e de consumo de energia. Além disso, encontra-se implantado em ambiente urbano, onde normalmente podem existir constrangimentos devido à difícil acessibilidade solar.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em duas partes e é constituída por cinco capítulos. Na primeira parte irá ser realizado um estudo teórico sobre o tema da dissertação, focado principalmente nas diversas soluções de reabilitação existentes, para a envolvente, sistemas de climatização e sistemas solares (térmicos e fotovoltaicos). A segunda parte estará mais relacionada com a caracterização do caso de estudo e a apresentação da metodologia.

O primeiro capítulo introduz o tema da dissertação, fazendo um pequeno enquadramento do mesmo, serão estruturados os objetivos e apresenta-se a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo são desenvolvidos diversos assuntos relacionados com a eficiência energética (sendo apresentados exemplos de estudos semelhantes, tanto de edifícios de habitação como de serviço/escolares), tais como: a legislação nacional, diferenças entre o “Net Zero Energy Building” e o “nearly Zero Energy Building”, sistemas de aproveitamento de energias renováveis e caracterização de tecnologias e soluções construtivas eficientes.

O terceiro capítulo diz respeito à caracterização do caso de estudo e à apresentação da metodologia utilizada, para realizar o estudo termo-energético do edifício.

No quarto capítulo são apresentados e analisados os resultados do estudo do desempenho termo-energético do edifício antes e após as medidas de melhoria serem implementadas.

Por fim, no último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas a partir do desenvolvimento desta dissertação e são listados alguns possíveis trabalhos futuros.

2. ESTADO DE ARTE

2.1. Eficiência energética

Até 2050 a UE está empenhada em desenvolver um sistema energético sustentável, concorrencial e descarbonizado (Diretiva 2018/844, 2018). Para tal os Estados-Membros e os investidores precisam de adotar medidas destinadas a atingir o objetivo de longo prazo relativo às emissões de gases com efeito de estufa e a descarbonizar o parque edificado (Diretiva 2018/844, 2018). Os Estados-Membros deverão procurar um equilíbrio eficiente em termos de custos entre descarbonizar o abastecimento energético e reduzir o consumo final de energia. Para o efeito, os Estados-Membros e os investidores precisam de uma visão clara que oriente as suas políticas e as suas decisões de investimento, que inclua metas e ações nacionais indicativas para alcançar os objetivos de eficiência energética a curto (2030), médio (2040) e longo prazo (2050) (Diretiva 2018/844, 2018). Com esses objetivos em mente, e tendo em conta as ambições globais da União em termos de eficiência energética, é essencial que os Estados-Membros especifiquem o resultado esperado das estratégias de renovação a longo prazo e monitorizem a sua evolução, através da definição de indicadores domésticos de progresso, sob reserva das condições e da evolução da situação a nível nacionais (Diretiva 2018/844, 2018).

A UE propôs um objetivo geral para todos os Estados-Membros através da Diretiva 2012/27/EU e do EPBD - Diretiva 2002/91/CE relativa à Eficiência Energética de Edifícios, que estabeleceu um quadro comum de medidas de promoção da eficiência energética das infraestruturas, tais como, por exemplo, minimizar as barreiras quanto ao mercado de energia, não só apostar na melhoria do aprovisionamento em termos de eficiência bem como na utilização de energia (Diretiva 2012/27/UE, 2012; Directiva 2002/91/CE, 2002). Sendo assim, os Estados-Membro da União Europeia estabeleceram regras com a finalidade de utilizar a energia de forma mais eficiente e promover edifícios de consumo quase nulo de energia.

Neste sentido, os países da União Europeia decidiram que, em 2020, o seu nível de emissões conjunto deverá ser 20% inferior ao de 1990 e ainda que em 2050 essa redução deverá situar-se entre 80% e 95% abaixo do nível de emissões de 1990 (European Commission, 2013). E a UE também se

comprometeu a aumentar em 20% o consumo de energia oriunda de fontes renováveis (European Commission, 2013).

Com o objetivo de melhorar o desempenho energético dos edifícios da UE, tendo em conta as condições externas e locais e também as exigências em matéria de clima interior e rentabilidade, surgiu a Diretiva 2010/31/EU (Directiva 2010/31/UE, 2010). Segundo a qual os Estados-Membros têm de utilizar uma metodologia comum e os respetivos requisitos mínimos, definidos pela diretiva em causa. O requisito para os sistemas abrange a energia utilizada para o aquecimento, a preparação de águas quentes sanitárias, o arrefecimento, a ventilação e a iluminação. Esta diretiva exigia que os Estados-Membros garantissem que, até 2019, os edifícios públicos tenham necessidades quase nulas de energia, e os restantes edifícios até 2020.

Portanto, cabe aos Estados-Membros estabelecer os requisitos mínimos de desempenho energético, fazendo distinção entre edifícios novos e edifícios existentes. Na construção de novos edifícios, estes requisitos devem ser cumpridos e, antes do início da construção, devem ser sujeitos a um estudo de viabilidade no que respeita à instalação de sistemas de fornecimento de energias renováveis, bombas de calor, redes urbanas ou coletivas de aquecimento/arrefecimento e sistemas de cogeração. Para os edifícios existentes que sejam sujeitos a reabilitação, devia ser melhorado o nível de desempenho energético, aplicável ao edifício ou a uma fração autónoma do seu conjunto, de modo a serem cumpridos os requisitos mínimos baseados na articulação entre as componentes técnicas, funcionais e económicas (Directiva 2010/31/UE, 2010).

A Diretiva (UE) 2018/844 (Diretiva 2018/844, 2018) do parlamento europeu e do conselho, de 30 de maio de 2018, veio alterar a Diretiva 2010/31/UE (Directiva 2010/31/UE, 2010) relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/UE sobre a eficiência energética (Diretiva 2018/844, 2018). Esta diretiva tem como objetivo reduzir ainda mais as emissões dos gases com efeito de estufa, aumentar a percentagem do consumo de energias renováveis, obter poupanças de energia consonantes com o nível de ambições da UE, e aumentar a segurança energética da Europa, a competitividade e a sustentabilidade, até 2030 (Diretiva 2018/844, 2018).

No panorama Europeu, cerca de 75% dos edifícios existentes, públicos e privados, têm um desempenho energético abaixo dos requisitos da Diretiva do Desempenho Energético de Edifícios (EPBD) (Bernardo, 2015).

O potencial de economia de energia nos edifícios é muito elevado, visto que mais de 50% do consumo pode ser reduzido através de medidas de eficiência energética (Bernardo, 2015). Esta redução do consumo energético traduz-se numa redução anual de quatrocentos milhões de toneladas de dióxido de carbono, quase a totalidade do compromisso da União Europeia no âmbito do Protocolo de Quioto (Bernardo, 2015).

O Protocolo de Quioto, firmado em dezembro de 1997, tem como objetivo diminuir as emissões de gases de efeito estufa e a busca de desenvolvimento sustentável (Segreti & Bito, 2006). Os países industrializados que aderiram ao Protocolo assumiram o compromisso de reduzir em pelo menos 5,2% as suas emissões combinadas de gases de efeito estufa em relação aos níveis de 1990 (Segreti & Bito, 2006).

Portugal possui uma elevada dependência externa em combustíveis fósseis, aproximadamente 77%, sendo a energia elétrica responsável por 25% do consumo final de energia, e o restante devido ao aquecimento/arrefecimento ambiente e aos transportes (Sousa, 2018). Os edifícios são responsáveis por 40% do consumo total de energia e 36% das emissões de CO₂ na Europa, enquanto que os edifícios em Portugal apresentam aproximadamente 30% dos consumos energéticos, sendo o segundo setor em termos de emissões de CO₂ (Sousa, 2018; LNEG, 2010).

As principais fontes de emissões de CO₂ são os produtos petrolíferos, o gás natural e os combustíveis sólidos que constituem fontes de energia essenciais (Directiva 2010/31/UE, 2010).

O consumo de energia nos edifícios de comércio e de serviço em Portugal, tem por base a utilização da energia elétrica (Bernardo, 2015), correspondendo:

- 74% eletricidade;
- 12% gás natural;
- 7% derivados do petróleo (GPL, gasóleo de aquecimento e fuel);
- 4% fontes de energia renovável (biomassa e solar).

Os edifícios do Estado também consomem essencialmente energia elétrica correspondente a quase 180 mil tep (Bernardo, 2015). O Estado é responsável por 13% da eletricidade consumida no sector dos serviços (Bernardo, 2015).

Na Portaria n.º 42/2019 e na Portaria n.º 98/2019 está definido o conceito de nZEB relativo aos edifícios de habitação e serviços, sendo “caracterizados por apresentarem um desempenho energético muito elevado, e terem as suas necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas, cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, seja produzida no local ou nas proximidades” (Portaria n.º 42/2019, 2019; Portaria n.º 98/2019, 2019; Decreto-Lei n.º 118/2013, 2013; Directiva 2010/31/UE, 2010).

Como foi referido anteriormente, os edifícios são responsáveis por um elevado consumo de energia na UE, logo a melhoria da eficiência energética dos edifícios públicos pode contribuir para reduzir as despesas assumidas pelos órgãos governativos e melhorar as condições de conforto dos utilizadores, pelo que alguns municípios têm vindo a realizar intervenções de melhoria no parque escolar (Ferreira, Almeida, Rodrigues, Pires, & Vieira, 2015). Para tal é necessário determinar as soluções de reabilitação de custo ótimo, ou seja, as soluções que apresentem o menor custo considerando o investimento na operação de reabilitação e os custos de utilização do edifício ao longo do seu ciclo de vida (Almeida, Ferreira, & Rodrigues, 2013).

A qualidade do ambiente interior das escolas (salas de aula), onde os alunos passam maioritariamente o seu tempo, é frequentemente inadequado, podendo ter consequências profundas a nível da aprendizagem (Wargocki, Porras-Salazar, & Contreras-Espinoza, 2019). O número de alunos que não passam nos exames tem aumentado, devido ao stress térmico causado por temperaturas externas elevadas (Wargocki, Porras-Salazar, & Contreras-Espinoza, 2019).

Através dos resultados de 24 estudos, dos quais oito foram realizados em edifícios de escritórios, um realizado numa fábrica e num escritório, onze realizados em laboratório, e quatro realizados nas salas de aula de escolas e faculdades, foi verificado que o desempenho diminuiu abaixo de 21-22°C e acima de 23-24°C, e que o desempenho ótimo seria em torno de 22°C (Wargocki, Porras-Salazar, & Contreras-Espinoza, 2019). A mudança no desempenho foi de cerca de 1% de decréscimo para cada aumento de 1°C na temperatura na faixa de 24 a 32°C (Wargocki, Porras-Salazar, & Contreras-Espinoza, 2019).

Continuam a surgir evidências que mostram que a qualidade do ar interior deficiente diminui o desempenho dos alunos, e pode também causar doenças e sintomas agudos de saúde (Almeida, et al., 2012). Como as crianças gastam em média de 7 a 11 horas por dia da semana na escola, espera-se que a qualidade do ar interior nas salas de aula desempenhe um papel fundamental na avaliação dos

efeitos de sua exposição pessoal à poluição do ar (Almeida, et al., 2012). Neste contexto, foi feito um estudo da exposição de crianças a partículas atmosféricas no interior de três escolas primárias de Lisboa, e um estudo desenvolvido em duas salas de aula reabilitadas e duas salas de aula não reabilitadas, para observar o impacto da reabilitação, de um edifício escolar no Porto (Almeida, et al., 2012; Almeida & Freitas, 2015).

Os estudos desenvolvidos mostram que, nas escolas primárias em Lisboa, as concentrações de PM_{2,5}–10 excedem significativamente as concentrações no ambiente e existem níveis altos de CO₂ que indicam uma ventilação inadequada, contribuindo para uma má qualidade do ar interior. No edifício escolar do Porto, os estudos desenvolvidos mostram que, nas salas de aula não reabilitadas os níveis de concentração de CO₂ e a temperatura média do ar eram mais elevadas, em relação às salas reabilitadas. Nas salas de aula reabilitadas, a concentração de CO₂ quase nunca ultrapassou os 1500ppm, enquanto nas não reabilitadas, a concentração de CO₂ ultrapassou os 1500ppm em 20% do período de ocupação. No entanto, verifica-se que a temperatura e a humidade relativa do ar são bastante semelhantes e dentro de limites adequados nas quatro salas de aula (Almeida, et al., 2012; Almeida & Freitas, 2015).

2.2. Legislação Nacional

A transposição da Diretiva 2010/31/2010, EPBD-recast, ocorreu pelo Decreto-Lei n.º 118/2013, que introduziu melhorias ao nível da sistematização e âmbito de aplicação ao incluir, num único diploma, o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), atendendo, simultaneamente, aos interesses inerentes à aplicabilidade integral e utilidade deste quadro legislativo, e aos interesses de simplificação e clareza na produção legislativa de carácter predominantemente técnico (Decreto-Lei n.º 118/2013, 2013). O Decreto-Lei n.º 118/2013, foi alterado pelos Decretos-Lei 68-A/2015, 194/2015, 251/2015, e pelo Decreto-Lei n.º 28/2016, que republicou aquele diploma, por forma a incorporar o ajustamento dos requisitos mínimos para várias tipologias de edifícios face às conclusões dos estudos de custo ótimo, tendo sido fixados requisitos de desempenho mais exigentes, em especial para os edifícios de serviços (Decreto-Lei n.º 28/2016, 2016).

A separação clara no âmbito de aplicação do REH e do RECS facilita o tratamento técnico e a gestão administrativa dos processos, reconhecendo também as especificidades técnicas de cada tipo de edifício naquilo que é mais relevante para a caracterização e melhoria do desempenho energético. Sendo que o

REH define os requisitos para edifícios novos de habitação ou edifícios de habitação sujeitos a grandes intervenções e também estabelece os parâmetros e as metodologias de caracterização do desempenho energético para todos os edifícios de habitação e para os seus sistemas técnicos. Enquanto que o RECS estabelece requisitos de caracterização do desempenho dos edifícios de comércio e de serviços e dos seus sistemas técnicos (Decreto-Lei n.º 118/2013, 2013).

Na Portaria n.º 42/2019 e na Portaria n.º 98/2019 está definido o conceito de nZEB relativo aos edifícios de serviços e de habitação respetivamente, sendo “caracterizados por apresentarem um desempenho energético muito elevado, e terem as suas necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas, cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, seja produzida no local ou nas proximidades” (Portaria n.º 42/2019, 2019; Portaria n.º 98/2019, 2019). Os edifícios de serviços com necessidades quase nulas de energia apresentam um valor máximo do indicador de eficiência energética (IEES), menor ou igual a 75% do valor máximo do indicador de eficiência energética de referencia, e um rácio de classe energética (RIEE) menor ou igual a 0,5. Os edifícios de habitação nZEB devem ter o valor das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_{ic}) deve ser inferior ou igual a 75% do seu valor máximo (N_i) e valor das necessidades nominais de energia primária (N_{tc}) deve ser inferior ou igual a 50% do seu valor máximo (N_t) (Portaria n.º 42/2019, 2019; Portaria n.º 98/2019, 2019).

2.3. nZEB “Nearly Zero Energy Building” e NZEB “Net Zero Energy Building”

A União Europeia tem vindo a desenvolver um conjunto de políticas que visam aumentar a eficiência energética dos edifícios através da redução dos consumos energéticos e a promoção do recurso a fontes de energia de origem renovável de modo a que se possam atingir, a curto/médio prazo, edifícios com necessidades de energia quase nulas, designados por edifícios nZEB. Sendo um edifício nZEB, aquele que apresenta um desempenho energético muito elevado, onde os gastos energéticos são cobertos em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis produzidas localmente ou nas suas proximidades, segundo a reformulação da Diretiva de Desempenho Energético de Edifícios (EPBD-recast - Energy Performance of Buildings Directive) (Directiva 2010/31/UE, 2010).

Em Portugal, edifícios nZEB são aqueles que apresentam necessidades quase nulas de energia que têm um elevado desempenho energético e em que a satisfação das necessidades de energia resulte em

grande medida de energia proveniente de fontes renováveis, designadamente a produzida no local ou nas proximidades (Decreto-Lei n.º 118/2013, 2013).

Segundo o relatório da REHVA (2013) um edifício nZEB, é aquele que possui uma procura de energia primária líquida superior a 0 kWh/(m².ano) técnica e razoavelmente alcançável, mas não superior ao valor limite nacional de energia primária não renovável. Este valor deve ser alcançado com a melhor combinação de medidas de eficiência energética e tecnologias de energia renovável, que podem ter ou não um nível ótimo de rentabilidade (Kurnitski, 2013).

Várias entidades na área da energia apoiam a utilização de outros indicadores para além do indicador de energia primária. O BPIE (Buildings Performance Institute Europe) aconselha o estabelecimento de requisitos para outros indicadores, como mostra na Figura 1, assim como a Ecofys (uma consultoria internacional de energia e sustentabilidade) também afirma que não parece ser apropriado tomar a energia primária como a única base para criar referências para nZEB (BPIE, 2011). Aquando do estabelecimento dos valores de referência para os indicadores de desempenho energético, o Estado-Membro deve considerar os seguintes fatores (Kurnitski, 2013):

- Nível de consumo de energia primária técnica e razoavelmente aceitável, sendo que razoavelmente aceitável significa em comparação com os valores de referência de desempenho energético, os edifícios devem ser devidamente classificados tendo em conta a sua funcionalidade;
- Percentagem de energia primária coberta por fontes de energia renováveis;
- Incentivos financeiros disponíveis para utilização de energias renováveis ou medidas de eficiência energética;
- Implementações em termos de custos e nível de ambição da definição.

Na avaliação do desempenho energético de um edifício específico durante a sua fase de operação, devem ser utilizados dados reais, obtidos através de medições no próprio edifício. Os projetistas dos edifícios apenas devem garantir que, utilizando como dados de entrada os dados-padrão estabelecidos para o tipo de edifício em causa, o edifício consiga alcançar um nível de desempenho energético para ser considerado um nZEB. No entanto, a utilização que é dada ao edifício não depende dos projetistas, mas dos utilizadores. Assim sendo, na fase de operação o edifício deve ser avaliado e devem ser feitas

medições da produção e consumo reais e devem ser esses os dados a utilizar aquando da avaliação do desempenho energético do edifício.

Na Figura 1 são apresentados os princípios base do conceito de nZEB.

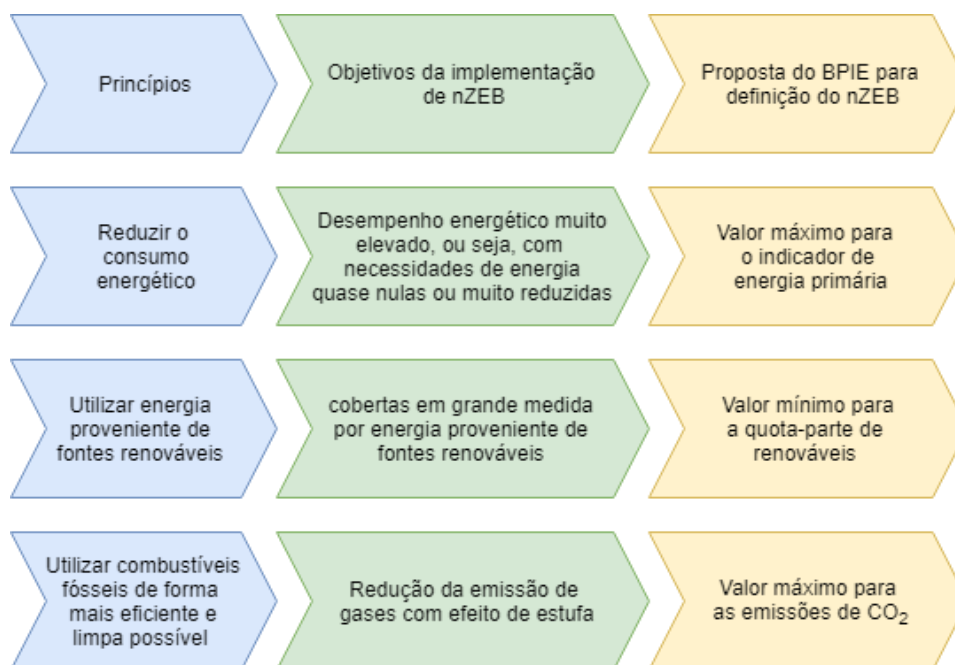


Figura 1 - Princípios base do conceito de nZEB (adaptado de (BPIE, 2011))

O facto de muitos locais não possuírem condições suficientes para a construção de edifícios capazes de produzir a mesma quantidade de energia que lhes é fornecida, relacionados com fatores climáticos e/ou geográficos, económicos e também devido à pouca disponibilidade de fontes de energia renovável no local, conduziram que a tentativa de implementação do conceito nZEB não fosse financeiramente viável (Kurnitski, 2013). Surgindo assim uma nova definição/conceito nZEB, ou seja, edifícios com necessidades quase nulas de energia. O nZEB passará constituir o requisito para novas construções a partir do início de 2021, ou de 2019 no caso de edifícios novos de entidades públicas, bem como a referência para as grandes intervenções no edificado existente (Decreto-Lei n.º 118/2013, 2013; Diretiva 2010/31/UE, 2010).

A União Europeia pretende estimular o aumento do número de edifícios energeticamente eficientes, contribuindo para a diminuição da sua dependência energética. O artigo 9º da EPBD-recast (Directiva 2010/31/UE, 2010) exigia que todos os Estados-Membros elaborem uma definição nacional de nZEB e que adotem medidas que promovam ativamente estes edifícios no mercado imobiliário. Neste sentido, a UE exigiu que todos os Estados-Membros apresentassem, até ao ano de 2015, os seus planos nacionais

com definições claras e medidas políticas e de incentivos financeiros para a promoção dos nZEB. Estes planos deviam incluir objetivos intermédios para melhorar o desempenho energético dos edifícios novos e deviam ser atualizados de três em três anos (BPIE, 2010).

A EPBD- recast não prescreve uma abordagem comum para a implementação de edifícios de necessidades energéticas quase nulas, nem descreve as categorias de avaliação em detalhe. Assim, cada Estado-Membro estabeleceu parâmetros diferentes, tanto em termos de qualidade e quantidade, nas suas definições nZEB (BPIE, 2010).

Na maior parte dos Estados-Membros as definições nZEB referem-se a energia primária como um dos principais indicadores, e em alguns casos, como por exemplo o Reino Unido, Noruega e Espanha, usam as emissões de CO₂ como principal indicador (BPIE, 2010). Para os edifícios residenciais, a maioria das legislações obrigam a que o consumo de energia primária não ultrapasse os 50kWh/m².ano (BPIE, 2010). Apenas onze Estados-Membros e duas regiões da Bélgica (Bruxelas e Flanders) elaboraram uma definição nZEB que compreende uma meta numérica para o uso de energia primária e consideram uma quota de energias renováveis de uma forma quantitativa ou qualitativa (BPIE, 2010).

Quinze países elaboraram uma definição nZEB, até 2015, e em três deles foram definidos requisitos nZEB que devem ser transpostos para as suas legislações nacionais, os restantes países, incluindo Portugal, a definição nZEB ainda se encontrava em discussão. Até 2015, relativamente aos edifícios existentes, apenas oito países estabeleceram requisitos nZEB (BPIE, 2010).

Nas Portarias n.º 42/2019 de 30 de janeiro e n.º 98/2019 de 2 de abril está definido o conceito de nZEB relativo aos edifícios de serviços e habitação, sendo “caracterizados por apresentarem um desempenho energético muito elevado, e terem as suas necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas, cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, seja produzida no local ou nas proximidades” (Portaria n.º 42/2019, 2019; Portaria n.º 98/2019, 2019). Os edifícios de serviços com necessidades quase nulas de energia apresentam um valor máximo do indicador de eficiência energética (IEE_s), menor ou igual a 75% do valor máximo do indicador de eficiência energética de referencia, e um rácio de classe energética (R_{EE}) menor ou igual a 0,5. Os edifícios de habitação nZEB devem ter o valor das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_{ic}) deve ser inferior ou igual a 75% do seu valor máximo (N_i) e valor das necessidades nominais de energia primária

(N_{tc}) deve ser inferior ou igual a 50% do seu valor máximo (N_t) (Portaria n.º 42/2019, 2019; Portaria n.º 98/2019, 2019).

Para atingir os objetivos da Diretiva 2018/844 (Diretiva 2018/844, 2018) cada Estado-Membro estabelece uma estratégia de longo prazo para apoiar a renovação, até 2050, do parque nacional de edifícios residenciais e não residenciais, tanto públicos como privados, para o converter num parque imobiliário descarbonizado e de elevada eficiência energética, facilitando a transformação rentável dos edifícios existentes em edifícios com necessidades quase nulas de energia.

Em relação ao termo NZEB, este é utilizado para se referir a um edifício ligado a uma infraestrutura energética (Santorini, Assunta, & Karsten, 2012). Visto que a palavra “net”, que significa “líquido”, salienta o facto de existir um balanço entre a energia fornecida ao edifício pelas redes e a energia que o edifício devolve às redes. Sendo ZEB um termo mais genérico, que pode também incluir edifícios autónomos (Santorini, Assunta, & Karsten, 2012).

O conceito base da definição de um edifício NZEB, consiste no resultado do balanço entre a oferta ponderada e a procura ponderada ser nulo, ou seja, quando a oferta ponderada é igual à procura ponderada num determinado intervalo de tempo (Santorini, Assunta, & Karsten, 2012). Sendo o edifício considerado “Plus ZEB”, caso a oferta ponderada exceda a procura ponderada (Santorini, Assunta, & Karsten, 2012; Kurnitski, 2013).

Um NZEB, sempre que possível, utiliza energia renovável gerada no local, no entanto, as fontes de energia renovável são intermitentes, pelo que nem sempre se reúnem as condições necessárias para gerar a quantidade de energia necessária para suprir a carga energética do edifício. Nessas alturas, o edifício tem que recorrer à importação de energia da infraestrutura energética. Quando a geração renovável local é superior à carga exigida pelo edifício, o excedente de energia renovável é exportado para a rede de energia, de forma a, pelo menos, devolver toda a energia que foi importada.

Não existe uma definição acordada internacionalmente para o conceito NZEB (Net Zero Energy Building). É reconhecido que são possíveis diferentes definições, de acordo com os objetivos políticos e condições específicas de cada país.

Existem diferentes perspetivas de edifícios NZEB, que diferem na parte dos consumos energéticos dos edifícios que devem ser compensados por produção de energias renováveis (Torcellini, Pless, Deru, & Crawley, 2006):

- Net Zero Site Energy: a produção de energia anual com origem em fontes renováveis é, pelo menos, igual ao consumo energético, considerando o edifício apenas e excluindo as fontes das proximidades;
- Net Zero Source Energy: a produção de energia anual é, pelo menos, igual ao consumo, considerando a fonte de energia primária utilizada na produção e no fornecimento de energia do edifício. Para calcular a energia primária total, a energia importada e exportada é multiplicada por fatores de conversão de energia útil para energia primária;
- Net Zero Energy Costs: o custo anual que a rede paga pelo fornecimento de energia exportada pelo edifício é, pelo menos, igual ao custo anual paga à rede pelo consumo de energia anual do edifício;
- Net Zero Energy Emissions: a quantidade anual produzida de energia renovável livre de emissões é, pelo menos, igual à quantidade anual de energia consumida através de fontes convencionais.

Relativamente à implementação dos requisitos nZEB, desde de 31 de dezembro de 2018 todos os novos edifícios públicos (detidos ou ocupados) e a partir de 31 de dezembro de 2020 todos os novos edifícios devem ser nZEB (Directiva 2010/31/UE, 2010). Sempre que possível, a renovação dos edifícios existentes deve cumprir os mesmos requisitos de desempenho energético dos edifícios novos desde que não existam restrições técnicas, funcionais ou económicas (Directiva 2010/31/UE, 2010; Diretiva 2012/27/UE, 2012). Assim, para atingir esses objetivos é fundamental estudar e implementar medidas de melhoria na reabilitação dos edifícios em Portugal.

Para atingir um edifício com necessidades quase nulas de energia, numa primeira fase é essencial ter em conta as necessidades energéticas do edifício e as possibilidades da sua redução, deve-se apostar em sistemas passivos e de aproveitamento de fontes naturais, tais como a iluminação e a ventilação. A utilização de sistemas energeticamente eficientes, com equipamento e sistemas de iluminação eficientes e usar tecnologias que garantam a otimização, tanto a nível térmico como relativo aos ganhos solares. Por fim, a segunda fase consiste na produção energia a partir de fontes de energia renovável, recorrendo a uma ou várias das diversas tecnologias existentes, de forma a dar resposta as necessidades energéticas restantes (Sartori, Napolitano, & Voss, 2012).

Assim, para reduzir as necessidades energéticas dos edifícios é necessário conjugar estratégias de conceção (sistemas passivos, iluminação e ventilação natural), novas tecnologias construtivas (otimização térmica da envolvente e dos ganhos solares), sistemas eficientes (equipamentos e iluminação eficiente) e uma boa integração urbana (Santos P. , 2017).

Para a produção de energia a partir de fontes renováveis, sendo as principais a energia solar, eólica, hídrica, geotérmica, das ondas das marés e de biomassa, deve ser dada prioridade às tecnologias que minimizem o impacto ambiental, que estejam disponíveis durante a vida útil do edifício, que estejam facilmente disponíveis e com elevada possibilidade de serem utilizadas recorrentemente (Torcellini, Pless, Deru, & Crawley, 2006). Os sistemas fotovoltaicos e os sistemas solares térmicos, para aquecimento de água são os mais utilizados para se atingir o balanço nulo de energia em edifícios (Torcellini, Pless, Deru, & Crawley, 2006).

As fontes de energia captadas das fronteiras do edifício também podem ser consideradas no balanço energético para se atingir o NZEB. No entanto, deve ser dada preferência à produção de energia no interior das suas fronteiras pois, fora destas, não existe garantia que possam ser utilizadas durante a vida útil do edifício. Recorrer a um local vizinho para gerar eletricidade não é tão favorável como um sistema fotovoltaico instalado na cobertura do edifício pois aquele local poderá vir a ter outras utilidades futuras que impedirão a sua utilização para a produção de energia (Torcellini, Pless, Deru, & Crawley, 2006).

Uma Casa Passiva (“Passive House”) utiliza os conceitos de Arquitetura Solar Passiva ou Arquitetura Bioclimática, que pode ser definida como uma arquitetura que, na sua conceção, aborda o clima como uma variável importante na fase de projeto, compreendendo as condições climáticas existentes no local (sol, vento e água) e definindo estratégias para que essas condições climáticas interajam positivamente com o edifício e propiciem as condições de conforto térmico adequadas a cada espaço. O papel do sol e da sua radiação é fundamental nesta relação (Gonçalves & Graça, 2004).

Os edifícios “Passiv Hous” combinam um elevado nível de conforto com um consumo de energia muito baixo. O conceito “Passiv Hous”, assenta sobretudo em estratégias para diminuir as transmissões térmicas entre o interior e o exterior, através dos níveis de isolamento, redução de pontes térmicas e garantir a estanquidade e a adequada ventilação do edifício, natural e/ou mecânica, para assegurar a qualidade do ar interior (Gauna, 2011).

2.4. Caracterização de tecnologias e soluções construtivas eficientes

2.4.1. Envolvente dos edifícios

A envolvente dos edifícios é a barreira que separa os ambientes exterior e interior, podendo ser decomposta em dois elementos fundamentais, sendo estes os elementos verticais (zona opaca e envidraçados) e os elementos horizontais (pavimentos e coberturas). A envolvente dos edifícios é a zona mais exposta às ações dos agentes externos, sendo que esta deverá garantir estabilidade e durabilidade. Os principais benefícios das envolventes eficientes consistem em (ADENE, 2016):

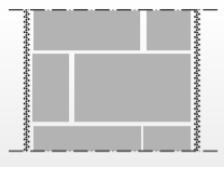
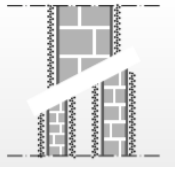
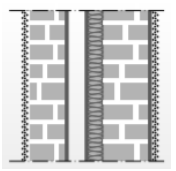
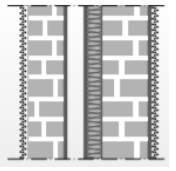
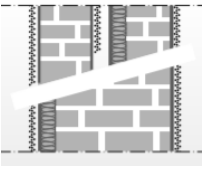
- Conservam o calor no interior do edifício, melhorando o seu conforto térmico;
- Reduzirem as patologias e melhorarem a salubridade no interior dos edifícios;
- Diminuírem os custos de energia associados a equipamentos de climatização;
- Melhorarem o isolamento acústico.

As paredes exteriores têm como principal função garantir a proteção de um edifício face aos diferentes fatores externos, nomeadamente às variações térmicas do ambiente exterior, enquanto que as paredes interiores têm como objetivo separar as zonas úteis das zonas comuns, criando divisórias e compartimentações no edifício. Um dos fatores a ter em conta para melhorar o conforto térmico de um edifício consiste na escolha de uma solução construtiva eficiente para as paredes exteriores, visto que constituem uma das maiores superfícies da envolvente dos edifícios, pois quanto maior o isolamento térmico menor será a transferência de calor.

Em Portugal a maioria dos edifícios construídos antes de 1990 (publicação da 1ª legislação térmica a nível nacional), não possui isolamento térmico nas paredes, correspondendo a 69% do edificado (ADENE, 2016). Na Tabela 1 estão representados os principais tipos de paredes construídas em Portugal e a respetiva percentagem de edifícios por tipo de parede.

Atualmente, os requisitos térmicos exigidos para as paredes implicam a colocação de isolamento térmico nas mesmas. Estes requisitos variam consoante as três zonas climáticas de inverno (I1,I2,I3) e de verão (V1,V2,V3) em que o país está dividido, sendo que as zonas com números mais elevados correspondem a climas de inverno e verão mais agressivos.

Tabela 1 – Tipos de paredes construídas em Portugal e a percentagem de edifícios por tipo de parede (adaptado de (ADENE, 2016))

				
Parede de pedra solta ou aparelhada	Parede simples ou dupla de alvenaria de tijolo	Parede dupla de alvenaria de tijolo com isolamento	Parede dupla de alvenaria de tijolo com isolamento	Parede dupla de alvenaria de tijolo ou simples, isolada pelo exterior
Sem isolamento	Sem isolamento	0 a 20 mm isolamento	40 a 50 mm isolamento	50 a 60 mm isolamento
$U = 2,00 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$	$U = 1,76 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$	$U = 0,92 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$	$U = 0,92 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$	Depende da zona climática
Anterior a 1960	1960 - 1990	1990 - 2006	2006 - 2013	Após 2013
25%	*44%	*22%	*8%	*1%
*% de edifícios por tipo de parede				

Na última década, foram introduzidos em Portugal diferentes sistemas de isolamento térmico pelo exterior, sendo os sistemas de isolamento térmico pelo exterior aplicados geralmente sobre um suporte constituído por uma parede em alvenaria ou em betão armado (Martins & Couto, 2015). Surgindo assim soluções construtivas mais eficientes com reforço de isolamento térmico pelo exterior, destacando-se os sistemas ETICS (Sistemas compostos de isolamento térmico externo), as fachadas ventiladas ou as fachadas verdes e as soluções com reforço de isolamento térmico na caixa de ar e pelo interior através da colocação de isolamento na face interior dos panos de parede e revestimento interior leve, por exemplo, em placas de gesso cartonado.

Os diferentes países europeus utilizam diversos sistemas de isolamento térmico de fachadas pelo exterior, quer na reabilitação de edifícios como também em novas construções. Estes sistemas constituem uma boa solução, tanto a nível energético como a nível construtivo.

Os ETICS mais comuns são constituídos por placas de poliestireno expandido, sendo aplicados em superfícies planas verticais exteriores de edifícios novos ou existentes, e também em superfícies horizontais ou inclinadas desde que não estejam expostas à precipitação.

Existem, diferentes composições em aplicação, com diferentes tipos de isolamento térmico, sintético (poliestireno expandido extrudido (XPS) e poliestireno expandido moldado (EPS), vegetal (aglomerado de cortiça expandida (ICB)) e mineral (lã mineral (MW ou CM)), e soluções de reboco delgado armado. Este sistema é constituído por placas de isolamento térmico, que são coladas ou fixadas ao suporte e revestidas com um reboco delgado aplicado em várias camadas, armado com uma ou mais redes de fibra de vidro, sendo o acabamento final realizado com um revestimento plástico espesso (Figura 2).

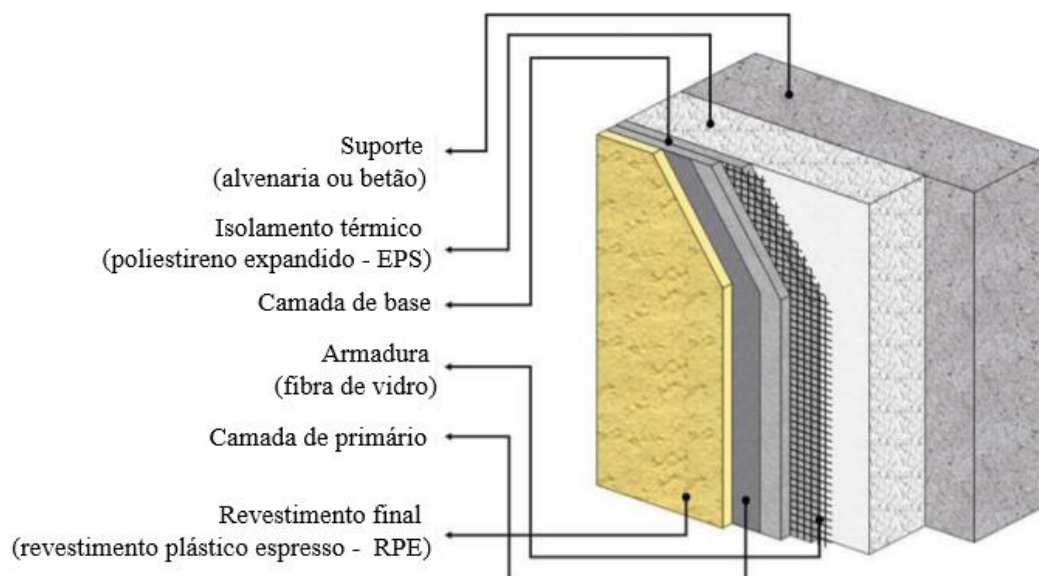


Figura 2 - Pormenor construtivo de um sistema ETICS (APFAC, 2014)

As soluções construtivas em sistema ETICS apresentam várias vantagens, das quais se destacam (Martins & Couto, 2015):

- Aplicação contínua com redução ou eliminação de pontes térmicas;
- Diminuição do risco de condensações no interior das paredes envolventes ou à sua superfície;
- Manutenção da inércia térmica interior dos edifícios, dado que a maior parte da massa das paredes se encontra pelo interior do isolamento térmico;
- Manutenção da espessura das paredes exteriores, mantendo a área habitável;
- Diminuição do gradiente de temperaturas a que são sujeitas as camadas interiores das paredes;
- Melhoria da impermeabilidade das paredes;
- Possibilidade de mutação do aspeto das fachadas e colocação em obra sem perturbar os ocupantes dos edifícios;
- Grande variedade de soluções de acabamento;
- Poupança energética e conforto interior;

- Aplicação em construção nova ou reabilitação.

Relativamente às desvantagens, é importante referir que o sistema ETICS não é passível de ser implementado na reabilitação de edifícios de valor patrimonial, pois descaracterizam as fachadas, e necessita de mão-de-obra especializada de modo a garantir a correta execução do sistema. A utilização de cores escuras no acabamento final poderá provocar um grande stress térmico nas várias camadas do sistema, provocando a fissuração devido ao aumento da absorção solar e à forte incidência da radiação solar, sobretudo nas fachadas Este e Oeste durante o verão (EPFAC, 2014).

A eficiência do sistema em termos de redução das trocas térmicas entre o interior e o exterior está muito dependente do tipo e espessura do material isolante utilizado. Esta eficiência poderá ser potenciada, no caso de construção nova, através da execução de alvenaria de suporte do sistema com elevada resistência térmica.

A Fachada Ventilada é uma solução que tem tido uma importância crescente na arquitetura contemporânea, quer pelas características técnicas quer pela sua estética (Cunha, 2006). Esta é constituída pelo revestimento ou camada exterior, uma subestrutura auxiliar que suporta o revestimento e por uma caixa de ar que normalmente incorpora o isolamento térmico (Mendes, 2009). O isolamento térmico pode ser de poliestireno expandido moldado ou extrudido, Lã de rocha ou de vidro, vidro celular e espuma rígida de poliuretano (Mendes, 2009).

Este sistema é caracterizado pelo afastamento entre a parede do edifício e o revestimento, criando, assim, um espaço com ar em movimento que permite a ventilação natural e contínua da parede do edifício, através do efeito de chaminé, ou seja, o ar entra frio pela parte inferior e sai quente pela parte superior (ver Figura 3), evitando assim as comuns humidades e condensações características das fachadas tradicionais e conseguindo deste modo um maior conforto térmico (Cunha, 2006).

A Fachada Ventilada tem, ainda, como outras vantagens a montagem fácil e possibilidade de colocação das instalações elétricas e sanitárias no espaço criado entre a parede e o revestimento, por outro lado, uma das desvantagens deste sistema está relacionada com o desprendimento dos elementos de revestimento devido a sistemas de fixação mal concebidos ou a uma aplicação deficiente. A quebra accidental ou intencional, em zonas acessíveis, dos elementos de revestimento também tem sido observada com alguma frequência (Santos, 2007).

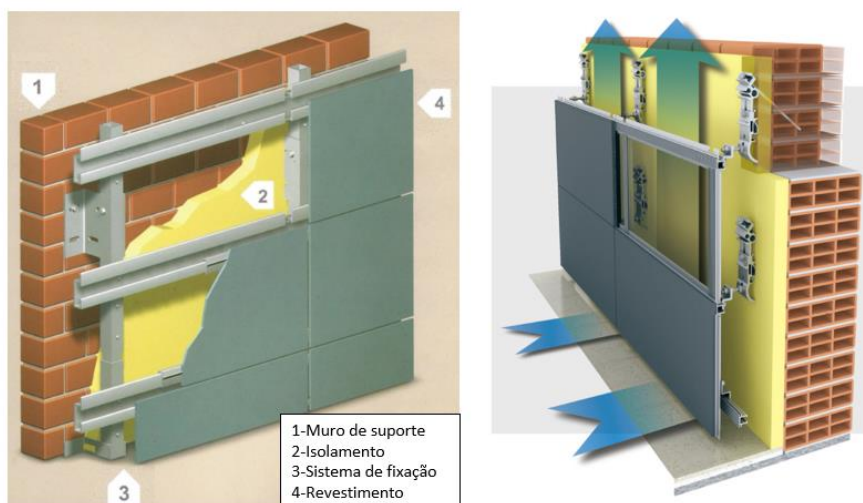


Figura 3 - Pormenor construtivo de uma fachada ventilada (esquerda); esquema do fluxo de ar numa fachada ventilada (direita) (Santos, 2007; cipagres, n.d.)

O revestimento exterior descontínuo pode ser executado por elementos de pedra natural, cerâmica, alumínio, madeira e derivados, e de materiais compósitos diversos, sendo que em edifícios de menor custo ou em intervenções de reabilitação, normalmente são utilizadas chapas de aço galvanizado ou de materiais plásticos compósitos (Santos, 2007). O isolamento contínuo pelo exterior limita as transferências de calor na parede e minimiza as pontes térmicas. Este isolamento deverá ser permeável ao vapor de água de modo a beneficiar da vantagem que este sistema oferece através da ventilação que canaliza o vapor de água para o exterior, evitando a ocorrência de condensações interiores.

Relativamente às fachadas ajardinadas, a utilização de espécies vegetais em paredes de edifícios é um hábito bastante antigo, a escolha das diferentes espécies para ornamentar os edifícios assenta frequentemente em trepadeiras de folha caduca. No entanto, foi também possível identificar o recurso a vegetação de folha persistente e plantas decorativas que preenchem total ou parcialmente a fachada como se de um revestimento se tratasse.

Ao longo dos anos, têm diminuído as áreas verdes e as áreas permeáveis, dando lugar ao betão, impermeabilizando o solo e criando zonas superaquecidas, sendo que uma das soluções sustentáveis para equilibrar a temperatura consiste na utilização de fachadas verdes em edifícios, pois diminuem a radiação solar, a poluição, aproximadamente em 30% e reduzem o barulho externo (Ribeiro, 2016).

As fachadas ajardinadas surgem como uma solução para a prevenção dos ganhos solares durante a estação de arrefecimento, devido à folhagem que reflete a radiação solar e também devido ao efeito da

evapotranspiração das plantas que diminui a temperatura do ar, resultando num menor gradiente térmico entre o interior e exterior, e consequentemente um menor fluxo de calor pela parede. A aplicação deste tipo de fachadas em centros urbanos, promove a biodiversidade, o bem-estar visual e psicológico e melhora também a qualidade do ar nas cidades. Estas fachadas possuem um efeito de isolamento térmico nos edifícios, o que proporciona a redução do consumo de energia e eficiência energética.

O maior arrefecimento associado a uma fachada ajardinada é sentido nos meses mais quentes, entre as 15h e as 21h, quando a radiação incide sobre a fachada Oeste, podendo resultar numa diminuição média da temperatura interior em 4°C, sendo que a temperatura exterior da parede diminui em média 12°C (Tilley, Price, Matt, & Marrow, 2012).

Existem três principais tipos de sistemas de fachadas ajardinadas (Jesus, 2016):

- **Sistemas de suporte:** permitem às plantas treparem no edifício através de suportes que poderão ser em telas metálicas ou cabos;
- **Sistema modular:** consiste na pré-fabricação de módulos que já contêm as plantas. Estes módulos são facilmente montados em estruturas metálicas fixas à parede;
- **Sistema de plantação:** consistem na montagem de caixas de plantação sobre uma estrutura fixa à parede, em intervalos regulares em que as plantas são posteriormente plantadas.

Nas Figura 4 está representada uma fachada ajardinada com recurso a um sistema de trepadeira e com recurso a um sistema modular.



Figura 4 - Fachada ajardinada: sistema tipo trepadeira (esquerda); sistema tipo modular (direita) (ecotelhado, n.d.; hildebrandt, n.d.)

Existem dois modelos de fachadas ajardinadas tendo em conta as suas técnicas construtivas, a direta e a indireta (Barbosa & Fontes, 2016). As fachadas ajardinadas diretas podem causar danos nas paredes, quando a estrutura não se encontra em boas condições (Barbosa & Fontes, 2016). Surgindo como

alternativa a este problema, as fachadas ajardinadas indiretas, visto que a vegetação cresce afastada das paredes do edifício (Barbosa & Fontes, 2016).

As fachadas ajardinadas com técnicas construtivas direta, apresentam algumas vantagens, tais como, baixo custo de instalação, fácil instalação e são indicadas para áreas exteriores, contudo apresentam algumas desvantagens, tais como, problemas com humidade, pode causar danos na fachada devido às raízes, custo com podas contínuas para controlo da massa vegetativa e algumas plantas possuem limite de altura e demoram a crescer (Barbosa & Fontes, 2016).

As principais vantagens das fachadas ajardinadas com técnicas construtivas indireta, consistem: em não existir contacto direto para apoio da vegetação na construção, menos problemas de humidade, permitem o desenvolvimento de paredes independentes e são indicadas para áreas exteriores (Barbosa & Fontes, 2016). Contudo, apresentam algumas desvantagens, tais como, alto custo e maior complexidade de instalação, custo com manutenção para controlo da massa vegetativa e algumas plantas demoram a crescer (Barbosa & Fontes, 2016).

A fachada do museu Quai Brandly da autoria de Patrick Blanc, possui aproximadamente 800 m² de jardins verticais, contendo mais de 15000 plantas de 150 espécies (ver Figura 5) (quaibranly, n.d.).

Apesar da vegetação contribuir para o efeito de isolamento térmico nos edifícios, é necessário colocar



Figura 5 - Museu Quai Brandly em Paris, França (quaibranly, n.d.)

material de isolamento entre os dois panos de parede nas paredes duplas, ou pelo interior. O material de isolamento na caixa de ar (paredes duplas) ou pelo interior pode ser de EPS, XPS, cortiça, lã de rocha, placas de fibra de madeira, placas de vidro celular, fibras naturais, painéis de materiais reciclados, entre outros. No caso do isolamento pelo interior, sobre o material de isolamento podem ser aplicados revestimentos aderidos, como rebocos e estuques, ou revestimento não-aderidos como placas de gesso

e madeira, em alguns casos, os painéis de isolamento já incluem o revestimento interior, facilitando a sua colocação (Thomaz & Ishioka, 2011).

O sistema de isolamento pelo interior reduz a área útil dos espaços. Neste sistema devem ser tratadas as pontes térmicas do exterior para que o sistema seja eficiente, evitando o risco de ocorrência de condensações na superfície e a consequente formação de patologias na estrutura das paredes, sendo por isso este sistema pouco utilizado (Thomaz & Ishioka, 2011).

A solução construtiva deste tipo de fachadas, consiste normalmente na colocação, nas paredes com isolamento na caixa de ar ou pelo interior, de uma estrutura de suporte, uma membrana de impermeabilização e por fim a vegetação (Amorim, 2015).

2.4.2. Coberturas

As coberturas são estruturas que se definem pela forma, observando as características de função e estilo arquitetónico das edificações, e têm como função principal a proteção das edificações, contra a ação das intempéries, atendendo às funções utilitárias, estéticas e económicas. Como as coberturas são o elemento de um edifício mais exposto à ação de agentes atmosféricos, onde ocorrem importantes trocas de calor entre o interior e o exterior (representado cerca de 30% das perdas de calor de num edifício), podem prejudicar o conforto dos utilizadores (ADENE, 2016). Nesse sentido, o isolamento térmico e acústico das coberturas é das soluções com uma maior relação custo-benefício, podendo influir bastante no consumo energético, essencialmente nas frações ou espaços a estas subjacentes. Em síntese, as coberturas devem preencher as seguintes condições:

- Funções utilitárias: impermeabilidade, leveza, isolamento térmico e acústico;
- Funções estéticas: forma e aspeto harmonioso com a linha arquitetónica, dimensão dos elementos, textura e cor;
- Funções económicas: custo da solução adotada, durabilidade e fácil conservação dos elementos.

No entanto, o excesso de isolamento térmico nas coberturas, associado a uma ventilação deficiente e à falta de isolamento nos elementos verticais da envolvente poderá conduzir a um sobreaquecimento dos espaços do edifício durante o verão, uma vez que o calor que entra pela envolvente vertical tem tendência a subir (o ar quente é mais leve) ficando retido junto aos elementos horizontais (coberturas). Por este

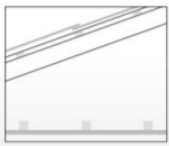
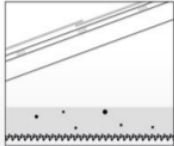
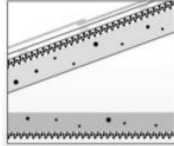
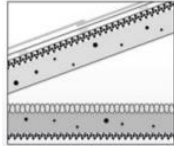
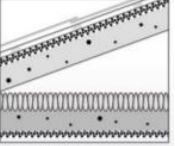
motivo, torna-se necessário conjugar o estudo térmico de todos os elementos da envolvente como um todo e não esquecendo a importância da ventilação no edifício (Vaz, Ferreira, Luso, & Fernandes, 2013).

À semelhança das paredes, o nível de isolamento adequado para as coberturas exteriores, para que se possa convergir para nZEB, irá depender da zona climática onde o edifício se localiza. Os principais benefícios das coberturas eficientes são (ADENE, 2016):

- Permitir conservar a temperatura no interior da habitação, melhorando assim o conforto da mesma;
- Minimizar a necessidade de utilização de equipamentos para aquecer e arrefecer os espaços;
- Diminuir as patologias dos edifícios, como por exemplo: condensações: aparecimento de fungos e bolores e/ou de manchas, potenciando assim a vida útil do edifício;
- O isolamento térmico permite também atenuar o sobreaquecimento dos espaços no verão, devido aos ganhos solares.

Em Portugal, a grande maioria dos edifícios construídos antes de 2005 não possui isolamento térmico na cobertura, conforme representado na Tabela 2 (ADENE, 2016).

Tabela 2 – Tipos de coberturas inclinadas existentes nos edifícios em Portugal (adaptado de (ADENE, 2016))

				
Cobertura em desvão com estrutura de madeira	Cobertura em desvão com estrutura em betão	Cobertura em desvão com estrutura de betão	Cobertura em desvão com estrutura de betão com isolamento na esteira	Cobertura em desvão com estrutura de betão com isolamento na esteira
Sem isolamento	Sem isolamento	Sem isolamento	60 a 70 mm isolamento	70 a 80 mm isolamento
*Anterior a 1960	*1960 - 1990	*1990 - 2005	*2006 - 2013	*Após 2013
*Ano de construção				

Segundo a ADENE, cerca de 97% das coberturas em Portugal são inclinadas e os restantes 3% são coberturas planas (ADENE, 2016).

As coberturas planas são caracterizadas por superfícies planas, também denominados de panos ou águas de uma cobertura, e estas devem ter inclinação mínima que permita o escoamento das águas das chuvas, e direcionadas segundo o plano de captação dessas águas. As coberturas horizontais têm inclinação entre 1 e 3% e as consideradas inclinadas tem declive igual ou maior de 3% (Martins & Couto, 2015).

Nas coberturas inclinadas o material de isolamento pode ser posicionado na empena ou na esteira. Se a cobertura inclinada estiver sobre um espaço útil o isolamento térmico deve ser colocado na empena (Figura 6), sendo preferível do ponto de vista energético, sobretudo quando existe uma estrutura de laje, uma vez que retira partido da inércia térmica dos elementos subjacentes ao isolamento. Na sua aplicação deve ser assegurada a existência de uma lâmina de ar ventilada, entre o revestimento exterior da cobertura e o isolante térmico, para evitar a degradação dos materiais. No caso da cobertura inclinada estar sobre um espaço não útil o isolamento térmico deve ser colocado na esteira, assegurando uma elevada ventilação do desvão (Figura 7), de forma a evitar o aquecimento do desvão no inverno e permitindo uma melhor ventilação do espaço no verão (Paiva, 2006; Rocha, 2008).

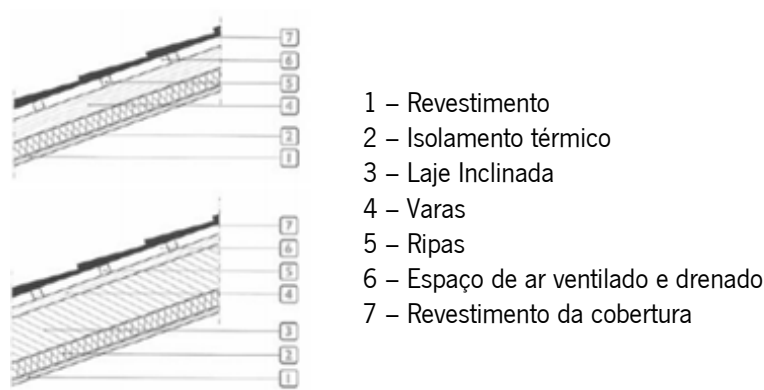


Figura 6 - Cobertura inclinada com isolamento na empena (Paiva, 2006)

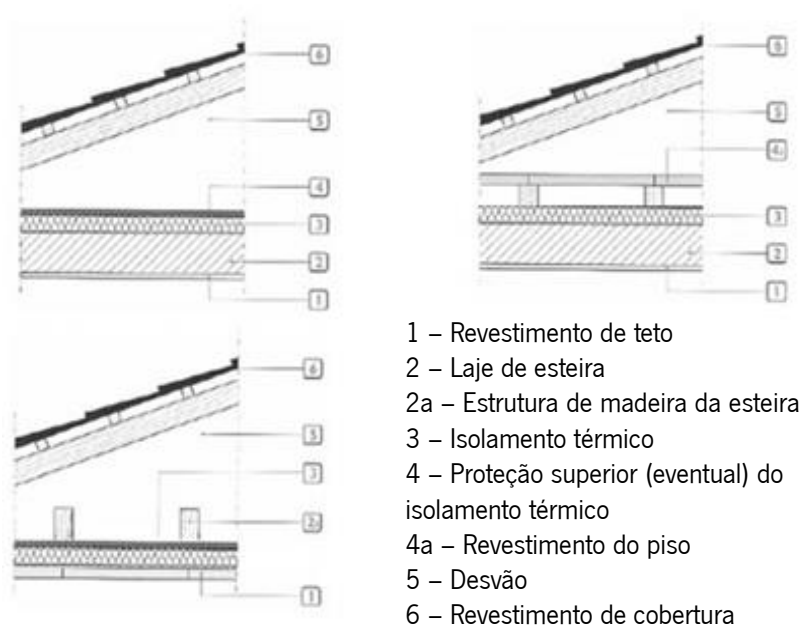


Figura 7 - Cobertura inclinada com isolamento na esteira (Paiva, 2006)

Dependendo da localização do isolamento térmico, as coberturas planas podem ser distinguidas em dois tipos: cobertura plana tradicional e cobertura plana do tipo invertida. A cobertura plana tradicional ou convencional (Figura 8) comporta uma série de efeitos que aceleram o desgaste do sistema de impermeabilização já que as membranas de impermeabilização, ao serem aplicadas sobre o isolamento térmico, ficam submetidas a choque térmico, não só diário como também sazonal e anual, danos mecânicos, particularmente durante a fase de obra, degradação por radiação ultravioleta (fenómeno minimizado com a colocação de material de proteção sobre o sistema de impermeabilização) e degradação, também do isolamento térmico, provocada por humidade presente na parte inferior do sistema de impermeabilização e proveniente de chuva que ocorra durante a execução, da própria humidade dos materiais de construção ou de condensação intersticial (Martins & Couto, 2015).

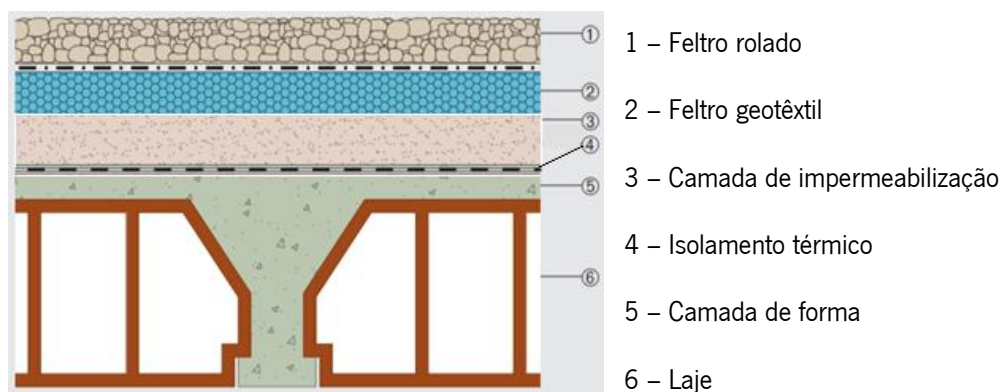


Figura 8 - Pormenor construtivo tipo de uma cobertura plana tradicional (adaptado de (DOW , n.d.))

Na cobertura plana invertida (Figura 9), tal como o nome indica, invertem-se as posições relativas convencionais dos sistemas de impermeabilização e isolamento térmico, estando o isolamento térmico sobre a impermeabilização, facto pelo qual a durabilidade do sistema de impermeabilização aumenta consideravelmente, ao serem suprimidos os efeitos referidos anteriormente. No entanto, durante o inverno, a água da chuva só é completamente evacuada quando chega à camada do sistema de impermeabilização (abaixo do isolamento térmico) podendo existir, neste caso, uma considerável perda de calor devido à elevada condutibilidade térmica da água (Mascarenhas, 2003).

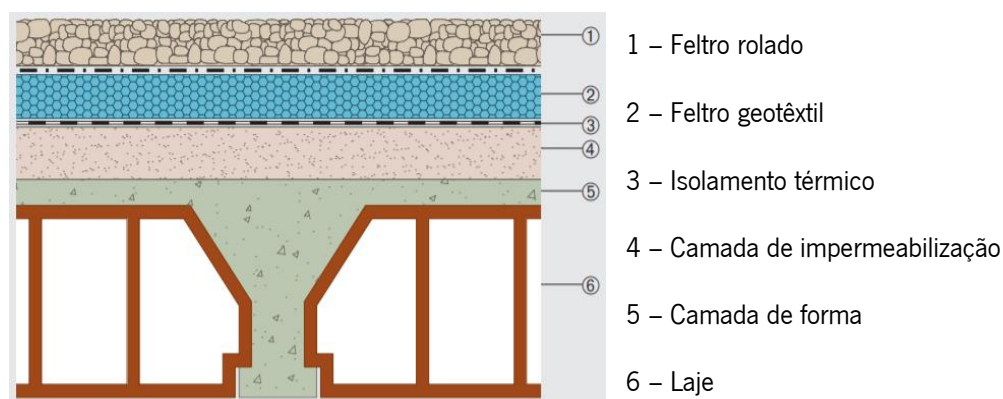


Figura 9 - Pormenor construtivo tipo de uma cobertura plana invertida (adaptado de (DOW , n.d.))

Nas coberturas planas o isolamento térmico pode ser aplicado pelo interior, localizado por baixo da laje, utilizado normalmente quando não é possível fazer uma intervenção mais complexa no edifício.

Um dos tipos de coberturas planas cuja utilização tem vindo a aumentar nos últimos tempos é as coberturas ajardinadas, estas são um dos elementos importantes na transformação das cidades atuais em ambientes urbanos mais sustentáveis. Integradas em estratégias de planeamento ecológico e de desenvolvimento sustentável contribuem de forma passiva para a obtenção de ambientes confortáveis no interior dos edifícios, reduzindo os consumos energéticos e permitindo que os edifícios se adaptem ao meio ambiente envolvente. Apesar das inúmeras vantagens e desvantagens que este tipo de proteção acarreta, assinala-se o facto de em Portugal as pessoas ainda estarem muito reticentes face à sua adoção. Destacam-se as seguintes características: um melhor desempenho térmico e acústico dos edifícios, uma redução do consumo de energia com aquecimento e arrefecimento, uma maior proteção passiva contra incêndios, um aumento do tempo de vida útil dos materiais utilizados como isolamento térmico e de impermeabilização e um aumento da capacidade de cobertura para retenção de água das chuvas e consequentemente menor pressão sobre os sistemas de escoamento de águas pluviais.

A cobertura ajardinada providencia um efeito de arrefecimento passivo durante o verão. A maior longevidade das membranas de impermeabilização é também assegurada neste tipo de coberturas, devido à menor amplitude de temperaturas que se verifica no exterior da laje, resultando numa limitação do stress térmico nas membranas da cobertura, e aumentando assim a longevidade destas (Jaffal, Ouldboukhitine, & Belarbi, 2012). Contudo, estas apresentam algumas desvantagens, devido ao crescimento das raízes que podem vir a danificar as camadas de impermeabilização, necessitam de manutenção com alguma periodicidade e de mão de obra especializada e é uma solução mais cara comparativamente às tradicionais (Engenharia e Construção, 2011). Na Figura 10 pode observar-se um pormenor construtivo tipo de uma cobertura ajardinada.

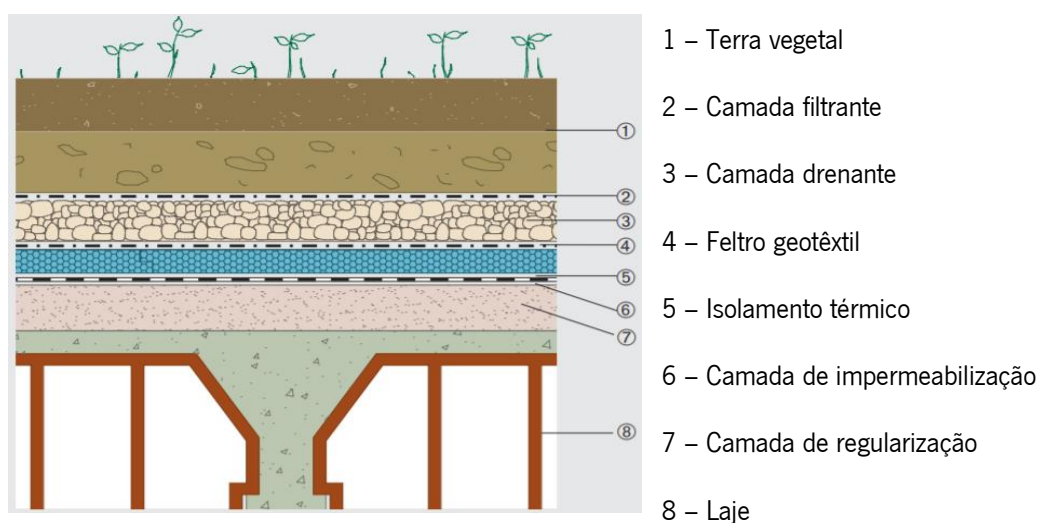


Figura 10 - Pormenor construtivo tipo de uma cobertura ajardinada (adaptado de (DOW , n.d.))

As coberturas do tipo “Cool Roof” ou telhados frios, reflete mais os raios solares, diminuindo a transmissão de calor para o interior do edifício (Voitille, 2012). Em muitas zonas climáticas um “Cool Roof” pode reduzir significativamente a carga térmica do edifício, proporcionando um maior conforto para os seus ocupantes, principalmente na época de verão, reduz o consumo de energia, exige pouca manutenção e a vida útil do telhado é mais elevada (Voitille, 2012). Embora, em climas frios os telhados brancos podem significar custos mais altos para aquecer o ambiente interior (Voitille, 2012).

A Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos Brasileira apresentou um projeto piloto que concluiu que a pintura branca do telhado de edifícios diminuiu a temperatura interior destes ambientes até 30% (Bellver, 2014).

2.4.3. Pavimentos

Os pavimentos em contacto com o exterior ou com espaços interiores não úteis (ENU), normalmente garagens, arrecadações, armazéns, varandas ou marquises fechadas, constituem superfícies da envolvente sujeitas a fluxos de energia correspondentes a perdas de calor no edifício (Gaspar, 2016). Tal como acontece nos restantes elementos opacos da envolvente (paredes e coberturas), os pavimentos devem ser isolados termicamente de modo a minimizar os fluxos de calor. O reforço do isolamento térmico de pavimentos pode fazer-se mediante três opções distintas, que se caracterizam pela localização do material isolante em relação à laje de pavimento (Gaspar, 2016):

- Isolamento térmico aplicado na face inferior;
- Isolamento térmico intermédio (preenchimento dos vazios entre régua de pavimentos de madeira, com isolamento térmico);
- Isolamento térmico aplicado na face superior.

A solução de isolamento térmico aplicado na face inferior, é a indicada para reabilitações não destrutivas, sempre que a zona inferior seja acessível, visto que são mais fáceis e rápidas de aplicar, de menor custo e são mais eficientes a nível térmico, uma vez que são aplicados na parte exterior (Silva J. , 2012). Enquanto a solução de isolamento térmico na face superior, é utilizada em casos de reabilitação destrutiva, tendo como desvantagem a redução do pé direito da habitação e a inércia térmica interior, e deverá ter uma adequada resistência à compressão, devido ao elevado número de cargas aplicadas (Silva J. , 2012). Nas Figuras 11 e 12 são apresentados os pormenores dos pavimentos com isolamento térmico na face inferior e superior em relação à laje.

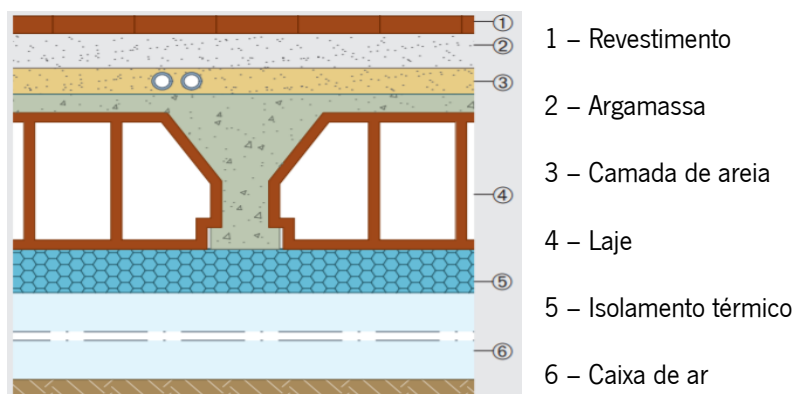


Figura 11 - Pormenor construtivo tipo de um pavimento com isolamento térmico na face inferior de laje (DOW, n.d.)

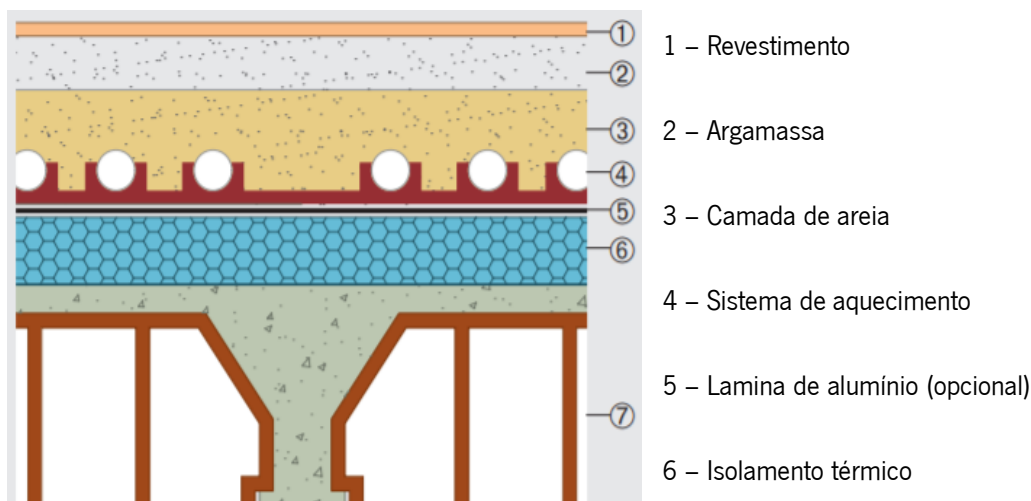


Figura 12 - Pormenor construtivo tipo de um pavimento com isolamento térmico na face superior de laje (DOW , n.d.)

No entanto, em espaços subjacentes ao pavimento que sejam acessíveis, o isolamento térmico deverá ser posicionado de modo a maximizar a inércia térmica interior, devendo optar-se, sempre que possível, por soluções de isolamento térmico sob o suporte (laje), sendo também geralmente de mais fácil e rápida aplicação e também de menor custo.

2.4.4. Vãos envidraçados e Sistemas de sombreamento

Através dos vãos envidraçados ocorrem perdas e ganhos de calor que influenciam significativamente o balanço térmico global dos edifícios. O tipo de caixilharias e a qualidade dos envidraçados a aplicar merecem especial atenção, pois são essenciais para a otimização do desempenho energético e ambiental dos edifícios.

Os vãos envidraçados são superfícies da envolvente que possuem elevada condutibilidade, sendo constituídos por vidro e caixilharia. As caixilharias podem ser constituídas por vários tipos de materiais sendo que os mais usuais são as caixilharias em madeira, material plástico (PVC) e alumínio.

Na Figura 13, estão representadas as diferentes soluções de envidraçados instaladas em Portugal, e a sua respetiva percentagem.



Figura 13 - Soluções de janelas instaladas em Portugal (ADENE, 2016)

Os ganhos térmicos relativos aos vãos envidraçados resultam da incidência de radiação solar através dos mesmos. Sendo que no verão, o objetivo consiste em minimizar os ganhos solares através dos envidraçados para evitar o sobreaquecimento do edifício, enquanto que na estação de arrefecimento o objetivo consiste em maximizar os ganhos solares através dos envidraçados, para aproveitar o máximo de energia solar para aquecer o edifício. A Figura 14 representa um esquema da divisão da radiação solar quando esta incide numa superfície envidraçada.



Figura 14 - Representação esquemática do fator solar dos vidros (Skkits, 2017)

Os vãos envidraçados são responsáveis pelo fenómeno de efeito estufa no interior dos edifícios, uma vez que a energia solar que entra num local através de um vidro é absorvida pelos objetos e elementos opacos interiores, que aquecendo refletem uma radiação térmica situada principalmente no campo do infravermelho, no comprimento de onda superior a $5\mu\text{m}$. A energia solar que entra pelos vãos envidraçados encontra-se deste modo concentrada num local com tendência a aquecer (Azoia, 2000).

Este fenómeno é benéfico durante o inverno porque permite ganhos solares importantes, mas é altamente prejudicial durante o verão, devendo ser tomadas medidas de modo a minimizar este fenómeno durante esta estação. De modo a evitar o sobreaquecimento dos espaços no verão devem ser tomadas as seguintes medidas (Azoia, 2000):

- Garantir uma correta ventilação do interior (ventilar os espaços durante os períodos de menores temperaturas exteriores, ou seja, durante a noite, associada à inércia térmica elevada);
- Instalar dispositivos de proteção solar, sempre que possível pelo exterior e móveis de preferência;
- Recorrer a vidros de transmissão energética limitada, designados por “vidros de controlo solar” que deixam passar somente uma determinada fração de radiação energética solar que permite iluminar sem aquecer.

De modo a dar resposta às necessidades de eficiência energética e às exigências do conforto térmico e comodidade dos ocupantes dos edifícios, é importante ter em consideração as várias características dos vãos envidraçados, tais como: tipo de caixilharia (simples e dupla, com ou sem corte térmico) e aos seus materiais constituintes, que podem ser de madeira, policloreto de vinil (PVC), alumínio e mistas, quando são compostas por dois ou mais dos materiais referidos anteriormente, tipo de vidro (simples, duplo, triplo, incolor, colorido, refletante, baixa emissividade) e os tipos de sistemas de sombreamento que podem ser classificados em função da respetiva localização no edifício, exterior ou interior e ainda podem dividir-se em função do seu manuseamento, se são móveis ou fixos (Pinho, 2013). Atualmente, é comum recorrer-se a meios de sombreamento fixos, instalando palas horizontais e verticais em torno dos envidraçados ou recorrendo à própria geometria do edifício.

Ainda em relação aos sistemas de sombreamento, estes possuem vários tipos de mecanismos, materiais, formas, dimensões e cores (Palhinha, 2009). Os grupos de sistemas de maior utilização nas diversas tipologias, são as palas verticais e horizontais, as lamelas ou “brise-soleils”, as malhas metálicas, as portadas, as venezianas, os estores de bandas horizontais, as telas, as cortinas e os vidros avançados de controlo solar (Palhinha, 2009).

Um exemplo da aplicação destes sistemas é o edifício Bloco Carnide (Figura 15), localizado no centro histórico de Carnide, em Lisboa, apresenta um sistema construtivo da fachada de ritmo reticulado e repetitivo que se baseia em painéis modulares de betão pré-fabricado, que contrastam com o sistema de painéis fixos e portadas de correr em madeira (Barata, Perloiro, Ferreira, Perloiro, & Appleton, 2012).



Figura 15 - Edifício Bloco Carnide localizado em Lisboa (Barata, Perloiro, Ferreira, Perloiro, & Appleton, 2012).

A estação ferroviária de Aveiro (Figura 16) é materializada de forma leve e verticalizada através de elementos laminares exteriores. Os elementos laminares verticais fazem parte da estrutura do edifício e permitem estabelecer a relação do interior com o exterior, mas permitem também a entrada da radiação solar no seu interior, de modo controlado e maioritariamente de forma difusa (Diogo, 2012). A instalação de janelas eficientes permite melhorar o conforto térmico e acústico no interior dos edifícios, diminuir as infiltrações de ar e permite poupar energia reduzindo a fatura energética (Poirazis, Blomsterberg, & Wall, 2006).



Figura 16 - Estação ferroviária Aveiro (Alves, 2013)

2.5. Sistemas de ventilação e climatização

A ventilação de um edifício consiste na renovação do ar interior por ar exterior de uma forma controlada e a legislação em vigor requer uma taxa de renovação mínima de ar no edifício de pelo menos 40%, por hora (ADENE, 2016). Um sistema de ventilação adequado diminui a acumulação dos gases poluentes,

proporcionando um elevado conforto e segurança dos ocupantes (ADENE, 2016). Assim, uma correta ventilação de um edifício é essencial para que se possa garantir uma boa qualidade do ar interior e prevenir a ocorrência de patologias nos elementos construtivos. A incorreta ventilação dos edifícios tem as seguintes consequências (ADENE, 2016):

- Ao isolar os edifícios por vezes a ventilação não é acautelada, reduzindo a renovação do ar interior e conduzindo ao aparecimento de humidades e bolores prejudiciais;
- Uma ventilação deficiente não remove os poluentes do interior dos edifícios;
- Os efeitos da má qualidade do ar derivada de uma fraca ventilação dependem da natureza do poluente, dose inalada, idade dos ocupantes, estado de saúde, vulnerabilidade da pessoa entre outros. Mesmo a curto prazo, os efeitos podem ser sérios: náuseas, tosse, doenças respiratórias, crises de asma, e, em casos extremos, asfixia e morte (intoxicação por monóxido de carbono);
- Uma fraca ventilação pode também originar patologias nos elementos construtivos do edifício, comprometendo a vida útil deste;
- A ventilação desadequada dos espaços pode ser responsável por 50% das perdas térmicas numa habitação.

Na conceção ou reabilitação de um edifício pode-se optar por três sistemas de ventilação (ADENE, 2016):

- Sistema de ventilação natural - consiste na admissão e extração de ar por meio de aberturas existentes na envolvente dos edifícios (janelas, grelhas de ventilação, chaminé) e sob pressão das forças naturais do vento e das pressões derivadas das diferenças de temperatura (efeito chaminé);
- Sistema de ventilação mecânica - consiste na admissão e extração de ar com recurso a dispositivos mecânicos (ventiladores, extratores, exaustores, entre outros), que asseguram a movimentação de ar no interior dos edifícios;
- Sistema de ventilação mista - é uma conjugação dos sistemas de ventilação natural e mecânica, sendo a adoção deste sistema uma boa solução quando o sistema de ventilação natural é insuficiente.

A climatização eficiente de um edifício passa por uma solução integrada e otimizada de medidas passivas, complementada pelo sistema ativo. A climatização passiva assume um papel fundamental na redução dos custos de exploração. Efetivamente, as medidas passivas aplicadas em fase de projeto e

construção contribuem para minimizar os consumos e custos com a energia durante toda a vida do edifício. Algumas destas medidas passivas passam por:

- Envolvente exterior do edifício ajustada ao local e região, com espessura de isolamento térmico, tipo de caixilharia e envidraçados e sistemas sombreamento adequados, de forma a reduzir as necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício;
- Exposição solar adequada, que permita ganhos térmicos na estação de aquecimento, e a proteção com sistemas de sombreamento exterior na estação de arrefecimento;
- Ventilação natural, que permita o arrefecimento, no verão, dos espaços de forma natural, com a entrada de ar exterior no edifício;
- Inércia térmica forte, que possibilite armazenar os ganhos solares no inverno e reduzir o sobreaquecimento em estações intermédias e de verão, de modo a amenizar as diferenças de temperatura no interior dos edifícios de forma eficaz, reduzindo custos com a climatização ativa;
- Um sistema de climatização bem dimensionado e adequado às necessidades, permite melhorar o conforto e segurança, a produtividade, a qualidade de serviço e a eficiência energética. Logo, os sistemas devem ser concebidos de acordo com as necessidades, atendendo às condições climáticas locais, às características do edifício e ao tipo de ocupação.

Os sistemas de climatização ativa podem ser classificados em sistemas centralizados, que são constituídos por unidades centralizadas de aquecimento ou de arrefecimento com uma rede de distribuição de calor e/ou frio para climatizar os diversos espaços, com possibilidade de aproveitamento do calor residual dos “chillers” (máquina frigoríficas) para aquecimento de águas sanitárias e piscinas, normalmente em grandes edifícios e em sistemas descentralizados, que são aparelhos, ou um conjunto de aparelhos que climatizam os espaços de forma individual, normalmente em pequenos edifícios com necessidades de climatização reduzidas (RNAE, 2014).

Os sistemas centralizados são, por exemplo, do tipo “Self-containg”, “fan-coil/chiler”, bombas de calor a duplo ciclo, caldeira a gás e caldeira a biomassa, e alguns dos sistemas descentralizados são o condicionador de ar de janela e os sistemas de ar condicionado do tipo “split” e “multi-split” (Silva D. , 2014; Bhatia, 2011). Nas Figuras 17 e 18, estão representados um tipo de sistema centralizado “self-containg” e um tipo de sistema descentralizado “multi-split”.



Figura 17 - Sistema centralizado: “self-containing” (Oliveira & Martins, 2014)

Os condicionadores de ar tipo “self-containing” são utilizados tanto para edifícios de habitação como em edifícios de serviço, e podem ser de condensação a ar ou a água. Num sistema “self-containing” típico com condensação a ar remoto, a unidade evaporadora é instalada nas proximidades ou no próprio local de utilização, e a unidade condensadora é instalada externamente ao ambiente (Ferraz, n.d.). A ligação destas unidades é feita através de tubagens de cobre devidamente isoladas, permitindo a circulação do fluído térmico (Ferraz, n.d.). O condensador de ar do tipo “self-containing” com condensação a água precisa de uma torre para arrefecer a água, para o seu funcionamento (Ferraz, n.d.). A água que sai do condensador aquecida, é movimentada até à torre de arrefecimento por uma bomba, para libertar o calor retirado do fluído refrigerante para o meio ambiente (Ferraz, n.d.).

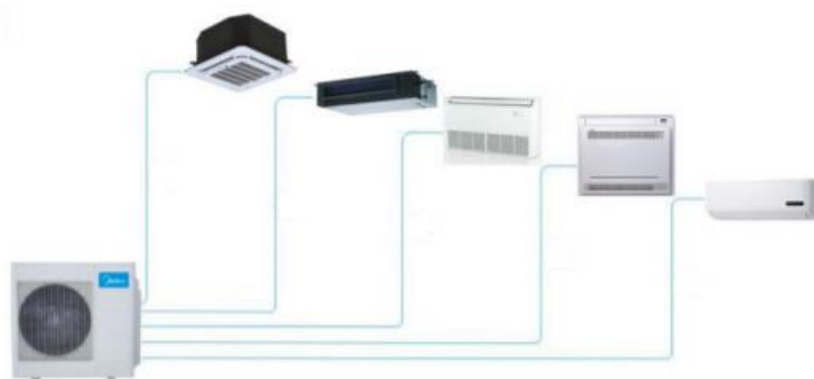


Figura 18 - Sistema descentralizado: “multi-split” (Oliveira & Martins, 2014)

O sistema de arrefecimento, representado na Figura 18, está dividido em dois blocos, constituído por uma unidade de tratamento de ar de expansão direta, instalada dentro do ambiente a que serve, designada unidade interna ou unidade evaporadora e por uma unidade condensadora, instalada

externamente, designada também como unidade externa (Oliveira & Martins, 2014). Existem quatro tipos de evaporadoras “hi-wall”, piso teto, cassete e “dutado (built in)” permitindo uma localização adequada dos equipamentos com a arquitetura local. Existem “splits” de rotação fixa ou variável, e condensadores com descarga de ar horizontal ou vertical (Oliveira & Martins, 2014).

O “split” tipo “hi-wall” é o mais utilizado, instalado na parede, e é mais indicado para edifícios de habitação e estabelecimentos comerciais de pequeno porte, o “split” tipo “piso teto” permite um bom aproveitamento do espaço, visto que pode ser instalado sobre o pavimento, na parede ou no teto, o “split” tipo cassete possui uma, duas, ou quatro vias para a saída de ar, proporcionando uma melhor distribuição do mesmo no ambiente, e o “split” tipo “dutado (built in)” é mais indicado para ambientes grandes onde o ar deva ser distribuído uniformemente, e permite instalação embutida (sancas, armários, etc), sendo mais discreto na decoração do ambiente (Oliveira & Martins, 2014).

As principais vantagens dos sistemas centralizados consistem no melhor controlo das condições de conforto e na maior eficiência energética, contudo são sistemas mais caros e normalmente complicados de instalar. Os sistemas descentralizados têm um custo inicial menor, instalação simplificada, fazem o controlo de uma zona independente e podem ser medidos individualmente na unidade, algumas das desvantagens consistem na menor duração do sistema, maior ruído e maior consumo de energia (kW/ton) (Bhatia, 2011).

2.6. Sistemas de aproveitamento de energia renovável

As fontes de energias renováveis são consideradas uma fonte de energia limpa e inesgotável, sendo obtidas das correntes de energias existentes a partir de processo contínuo natural como o sol, vento, água corrente, processos biológicos e fluxos de calor geotérmico (Portal das energias renováveis, 2015).

A integração de energias renováveis em edifícios tem como principal objetivo a incorporação de sistemas técnica e economicamente viáveis de captação e transformação dessas energias em fontes de energia que sejam úteis para o edifício, contribuindo assim para edifícios energeticamente eficientes (Portal das energias renováveis, 2015). Existem vários tipos de sistemas de aproveitamento de energia renovável, como por exemplo: sistemas eólicos, a biomassa, solares e a energia geotérmica (Portal das energias renováveis, 2015).

Foi realizado um estudo, na Austrália, para avaliar alguns indicadores de sustentabilidade para tecnologias de energia renovável (Evans, Strezov, & Evans, 2008). Os indicadores utilizados foram o custo da eletricidade gerada, a emissão de gases de efeito estufa durante o ciclo de vida da tecnologia, disponibilidade e limitações de fontes renováveis, eficiência energética, uso do solo, consumo de água e impactos sociais (Evans, Strezov, & Evans, 2008). Os impactos sociais foram avaliados qualitativamente com base nos principais impactos individuais (Evans, Strezov, & Evans, 2008). Após o estudo, cada tecnologia foi classificada de 1 a 4 de acordo com o indicador, conforme apresentado na Tabela 3, sendo 1 a melhor tecnologia para esse indicador (Evans, Strezov, & Evans, 2008).

Concluiu-se, para as condições de estudo, que a energia eólica é a mais sustentável, seguida da energia hidroelétrica, fotovoltaica e geotérmica (Evans, Strezov, & Evans, 2008). Em comparação com as outras tecnologias a energia eólica foi identificada como a que apresenta menor emissões de gases de efeito de estufa, menor consumo de água e impactos sociais, contudo exige maior área e maior custo (Evans, Strezov, & Evans, 2008).

Tabela 3 - Ranking de sustentabilidade (Evans, Strezov, & Evans, 2008)

Tecnologia	Fotovoltaica	Eólica	Hídrica	Geotérmica
Custos	4	3	1	2
Emissões de CO ₂	3	1	2	4
Disponibilidade e limitações de fontes renováveis	4	2	1	3
Eficiência energética	4	2	1	3
Uso do solo	1	3	4	2
Consumo de água	2	1	3	4
Impactos sociais	2	1	4	3
Total	20	13	16	21

2.6.1. Sistemas de biomassa

A biomassa é a forma mais utilizada de energia renovável, maioritariamente utilizada no terceiro mundo, mas até recentemente, menos no mundo ocidental. A identificação de espécies de biomassa adequadas, tem tido grande relevância, que podem fornecer produtos de grande energia, para substituir fontes convencionais de energia de combustível fóssil, como o petróleo e o carvão (McKendry, 2001).

A biomassa é uma forma de armazenamento de energia solar. As plantas capturam energia do sol com uma eficiência de cerca de 0,1%, transformam-na em energia química e armazenam-na sua estrutura

celular. As plantas e as árvores absorvem o CO₂ da atmosfera armazenando-o na sua estrutura celular. A queima da biomassa devolve à atmosfera o CO₂ armazenado. Com o crescimento de novas plantas e árvores este CO₂ libertado é novamente capturado, mantendo assim o ciclo do carbono atmosférico em equilíbrio, desde que a biomassa seja regenerada e recolhida para utilização, o ciclo pode ser mantido em equilíbrio indefinidamente. Uma gestão sustentável das florestas e pastos é imprescindível para que o ciclo do carbono não seja alterado (Portal das Energias Renováveis, 2018).

A biomassa vegetal encontra-se, normalmente num estado sólido agregado, tendo uma forma geométrica e um teor de água que, na maior parte dos casos e por razões técnicas, define o uso energético direto (Portal das Energias Renováveis, 2018). Relativamente à energia calorífica, o calor é normalmente produzido em sistemas de combustão, sendo que em pequena escala este pode ser usado para aquecer qualquer edifício (lareiras, salamandras, etc.) e em grande escala para produzir calor em centrais que, por meio de redes térmicas, distribuem o calor a diversos edifícios para aquecimento ambiente e de águas sanitárias, a energia mecânica é produzida por meio de geradores de calor e energia, com as máquinas a vapor ou motores de combustão interna e a energia elétrica, os sistemas que produzem energia mecânica, em motores de combustão ou turbinas de combustão direta e indireta, são acoplados a geradores elétricos, e estes convertem a energia mecânica em energia elétrica.

Vantagens da utilização de energia de biomassa (Portal Energia, 2016):

- É uma energia renovável;
- É pouco poluente, não emitindo dióxido de carbono (de acordo com o ciclo natural de carbono neutro);
- É fiável e a resposta às variações de procura é elevada;
- A biomassa sólida é barata, sendo as suas cinzas menos agressivas para o ambiente;
- Verifica-se uma menor corrosão dos equipamentos (caldeiras, fornos, etc);

Este sistema possui algumas desvantagens, tais como (Portal Energia, 2016):

- Desflorestação de florestas, além da destruição de habitats;
- Possui um menor poder calorífico quando comparado com outros combustíveis;
- Dificuldades no transporte e no armazenamento de biomassa sólida.

2.6.2. Sistemas solares

2.6.2.1. Sistemas solares térmicos

O sistema solar térmico converte a energia do sol em calor útil, através do coletor solar térmico colocado no exterior do edifício, geralmente na cobertura, por onde circula um fluido de transferência térmica. Uma rede de tubagens permite o escoamento deste fluido entre o coletor, onde é aquecido, e o depósito de acumulação, onde é armazenada a energia térmica. O armazenamento no depósito permite a utilização da água quente nos períodos em que as necessidades não coincidem com a disponibilidade do recurso, por exemplo, durante a noite (ADENE, 2016).

As principais vantagens do sistema solar térmico consistem em a energia solar térmica ser uma fonte de energia renovável, inesgotável que pode garantir até 70% das necessidades de água quente, permite reduzir o custo da energia, e o tempo de recuperação do investimento deste sistema varia entre 10 a 12 anos, dependendo da energia de apoio, tipo de instalação e fim a que se destina, para um equipamento cujo tempo de vida útil é da ordem de 20 anos (ADENE, 2016).

Os sistemas solares térmicos podem ser do tipo circulação forçada ou termossifão, diferenciando-se na forma como o fluido e a água circulam no sistema.

Os sistemas de circulação por termossifão (Figura 19) utilizam as leis da física para fazer a água circular de forma gratuita no sistema, usando os princípios da gravidade e da termodinâmica, o sistema é calculado de forma a que a água quente suba para o reservatório naturalmente enquanto que a água fria desce para o painel solar (Freire, 2017). Este sistema elimina completamente a necessidade de uma bomba elétrica para fazer circular a água, sendo mais económico por este motivo (Freire, 2017). O sistema é de fácil instalação e o tamanho do reservatório é definido conforme as necessidades de água quente sanitária de cada edifício, assim como o tamanho dos coletores solares (Marques F. , 2014). Este sistema é composto por painéis solares planos e depósito de água (localizado na parte superior dos painéis), sendo normalmente utilizados em moradias unifamiliares (Freire, 2017).

Para melhorar a utilização e eficiência do sistema de circulação por termossifão é importante que toda a tubagem que faz a ligação do depósito aos coletores solares esteja inclinada no sentido descendente,

permitindo evitar a formação de bolhas de ar, mantendo o perfeito funcionamento do sistema (Ribeiro V., 2014).

Dependendo das aplicações, este tipo de sistema poderá não ser tão eficiente como os sistemas de circulação forçada, mas obriga a que o reservatório de água esteja instalado acima dos painéis solares (Carvalho M. F., 2014).

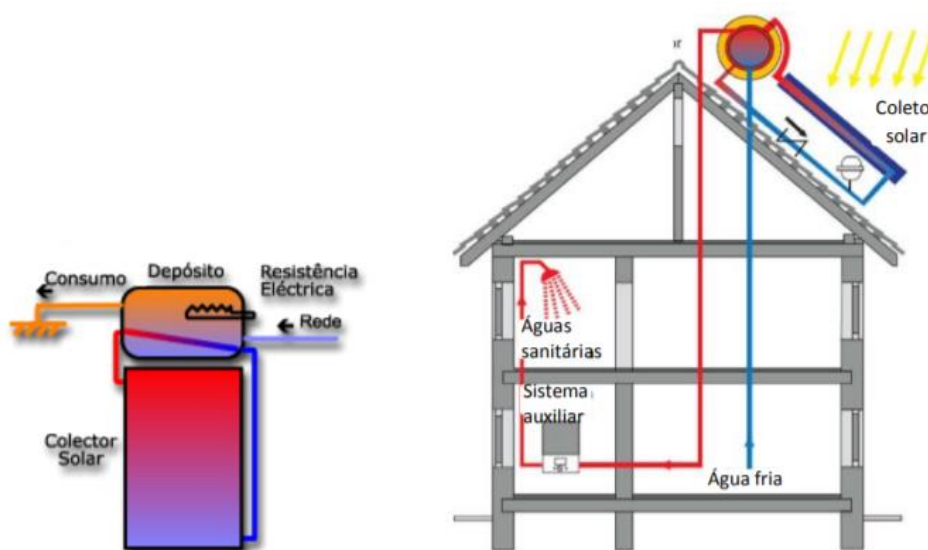


Figura 19 - Sistema solar térmico do tipo termossifão (Carvalho M. F., 2014)

Os sistemas de circulação forçada têm o reservatório de água separado dos painéis solares, permitindo ter o reservatório em qualquer compartimento do edifício e os painéis instalados na cobertura (Mexa, 2011). Um sistema solar térmico de circulação forçada está representado na Figura 20.

Ao contrário do sistema termossifão, a água ou fluido térmico circula no sistema com auxílio de uma bomba controlada eletronicamente que entra em funcionamento sempre que a temperatura nos coletores seja superior à do depósito em aproximadamente sete graus Celsius, permitindo uma maior eficiência, já que o sistema pode calcular quando será necessário ter a água ou fluido térmico a circular e com que caudal esta circula, mas tem necessidade de energia elétrica, o que implica custos mais elevados (Mexa, 2011; Carvalho M. F., 2014).

O sistema solar térmico por circulação forçada é composto por um conjunto de equipamentos, nomeadamente painéis solares, depósito, grupo de circulação, central de controlo, entre outros e são

ideais para aplicações individuais e coletivas, tais como: habitação (unifamiliar, edifícios coletivos), serviços (lares, restaurantes, hotéis, etc.) e indústria.

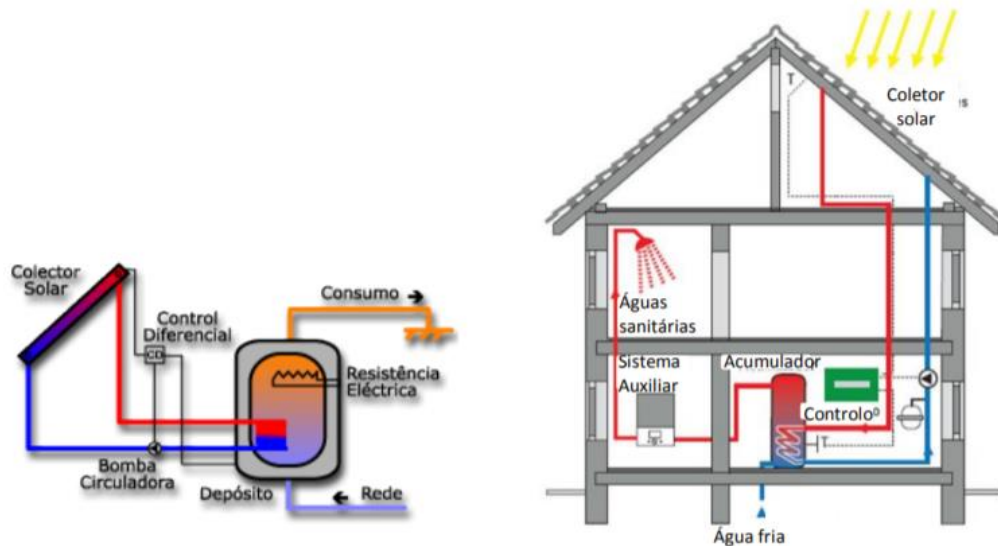


Figura 20 - Sistema solar térmico do tipo circulação forçada (Carvalho M. F., 2014)

O sistema solar térmico do tipo termossifão (sistema passivo), apresenta como vantagens, não requerer eletricidade, ter uma boa proteção contra congelamento, ser um sistema simples e de baixo custo, sendo mais utilizado em edifícios unifamiliares (Ribeiro V. , 2014). Contudo, este sistema apresenta algumas desvantagens, tais como, o depósito deve estar colocado acima dos coletores, é volumoso e tem menor eficiência comparativamente com o sistema solar térmico do tipo circulação forçada (Ribeiro V. , 2014).

As principais vantagens do sistema solar térmico do tipo circulação forçada (sistema ativo), consistem: ser possível colocar o depósito em qualquer lugar, tem uma boa proteção contra congelamento e é discreto, sendo utilizado em edifícios multifamiliares (Ribeiro V. , 2014). Contudo apresenta algumas desvantagens, tais como, requer potência elétrica, o permutador de calor de duas paredes e anticongelante reduzem a eficiência e tem um custo mais elevado (Ribeiro V. , 2014).

Os sistemas solares térmicos podem ser integrados nos edifícios em diferentes zonas, tais como na cobertura, fachada, como elemento de sombreamento e varandas (Figura 21).



Figura 21 - Edifício residencial na suíça com sistema solar térmico na cobertura (esquerda); edifício com sistema solar térmico na fachada (direita) (Vargas, 2011; Medeiros, 2009)

2.6.2.2. Sistemas fotovoltaicos

O efeito fotovoltaico que transforma diretamente a energia solar em corrente elétrica concilia a fonte mais importante, o Sol, com a principal forma de energia, a elétrica. O efeito fotovoltaico pode ser explicado como o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. Essas estruturas de material semicondutor são denominadas de células fotovoltaicas (Marques J. , 2009).

As células fotovoltaicas são constituídas por duas camadas, uma negativa (com excesso de eletrões) e outra positiva (com défice de eletrões), sendo o silício dos materiais semicondutores mais utilizados. A radiação solar ao incidir nas células fotovoltaicas provoca a interação entre os eletrões gerando eletricidade, logo quanto maior for a intensidade da radiação maior será o fluxo de eletricidade (ADENE, 2016). A corrente elétrica que se cria nos painéis ainda não se encontra pronta para uso que a grande maioria dos aparelhos utiliza corrente alternada e a corrente gerada pelos painéis solares fotovoltaicos é corrente contínua. Por este motivo, torna-se necessário utilizar um inversor de corrente, designado por AC/DC (ADENE, 2016).

As células fotovoltaicas são fabricadas, na sua grande maioria, usando o silício (Si) e podendo ser constituída de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo (Figura 22). A eficiência das células fotovoltaicas é reduzida, normalmente de 15%, e as poucas com eficiência mais alta têm um

custo de produção muito elevado (Machado & Miranda, 2015; Portal Energia, 2017). É considerada uma energia limpa, por ser uma forma de conseguir obter energia sem criar resíduos (Portal Energia, 2017).

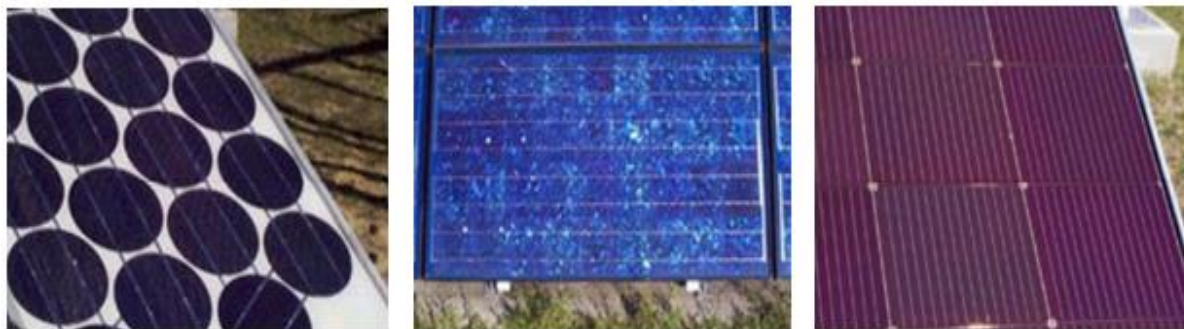


Figura 22 - Célula de silício monocristalino (esquerda); célula de silício policristalino (centro); célula de silício amorfo (direita) (Portal Energia, 2017)

Os sistemas fotovoltaicos apresentam diversas vantagens, tais como, o baixo custo de manutenção, é uma energia limpa e renovável, possuem uma vida útil longa (durabilidade superior a 25 anos), são de fácil instalação (Lázaro, 2016). Contudo, estes sistemas apresentam algumas desvantagens, tais como o elevado custo inicial em comparação com outros sistemas, a variação de energia produzida está dependente do clima e as formas de armazenamento de energia ainda são caras e pouco eficientes comparativamente a outros meios de produção e armazenamento de energia (Lázaro, 2016).

Relativamente ao objetivo de produção estes sistemas podem ser distinguidos em sistemas de Unidades de Pequena Produção (UPP) correntemente designadas por microgeração, em que o objetivo principal é injetar a energia produzida diretamente na rede elétrica de serviço público (RESP) e os sistemas de Unidades de Produção para Autoconsumo (UPAC) em que o principal propósito é o fornecimento de energia diretamente ao edifício e poderá incluir um conjunto de baterias de armazenamento de energia elétrica (Figura 23) (Solar Project, 2018).

O modelo de funcionamento das UPP, instalada no local de consumo, é o seguinte (Solar Project, 2018):

- A unidade de pequena produção (UPP) injeta a totalidade da energia produzida na rede elétrica de serviços públicos (RESP);
- A Instalação de consumo associada, recebe toda a eletricidade proveniente do respetivo comercializador;
- A UPP é instalada no local de consumo;

- A Potência de ligação da UPP tem de ser inferior à potência contratada na instalação de consumo e nunca superior a 250 kW;
- Numa base anual, a energia produzida pela UPP não pode exceder o dobro da eletricidade consumida na instalação de consumo.

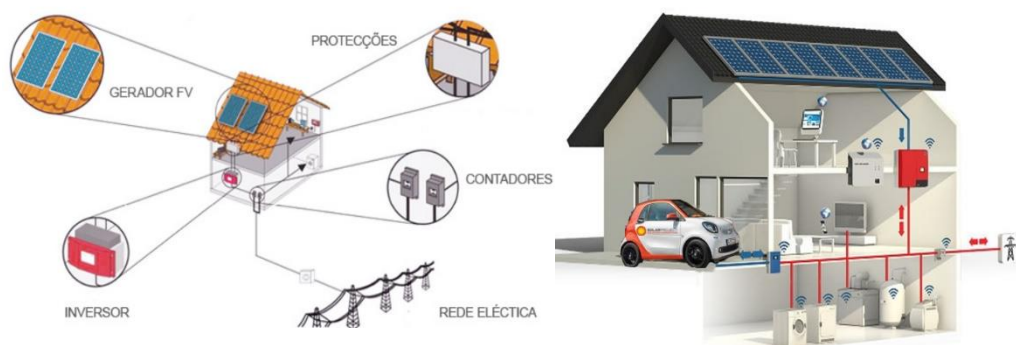


Figura 23 - Unidades de Pequena Produção (UPP) (esquerda); Unidades de Produção de Autoconsumo (UPAC) (direita) (Solar Project, 2018)

O modelo de funcionamento das UPAC, instalada no local de consumo, é o seguinte (Solar Project, 2018):

- A unidade de produção (UPAC) produz preferencialmente para satisfazer as necessidades de consumo;
- A energia produzida é instantaneamente injetada na instalação de consumos;
- O excedente produzido é injetado na RESP, evitando o desperdício;
- A UPAC é instalada no local de consumo.

Os painéis solares fotovoltaicos são os constituintes mais comuns e mais rentáveis das UPAC, no entanto estas unidades podem obter a energia através de outras fontes de energia renovável sem ser os convencionais painéis solares fotovoltaicos, como por exemplo, os sistemas de aproveitamento de energia eólica.

Os sistemas fotovoltaicos nos edifícios podem também ser integrados nas coberturas, paredes e em varandas, tendo a possibilidade de funcionar como elementos de sombreamento, para além de produzirem energia elétrica, como por exemplo a cobertura de varandas e as telhas fotovoltaicas (Figura 24) em que estas integram mini painéis solares embutidos em seu interior (Greener, 2016; SustentArqui, 2014).



Figura 24 - Telha fotovoltaica (esquerda); cobertura de varanda (direita) (Greener, 2016; SustentArqui, 2014)

O Edifício Solar XXI (Figura 25) é um edifício com funções de serviços (salas e gabinetes de trabalho) e laboratórios, na sua fachada sul foram integrados sistemas solares fotovoltaicos com painéis modulares, em harmonia com os envidraçados. Este sistema foi pensado de forma a que se pudesse aproveitar o calor produzido pelos painéis fotovoltaicos no período de Inverno e, assim, contribuir para o aquecimento do ar ambiente dos gabinetes e espaços contíguos (INETI, 2005).



Figura 25 - Vista geral da fachada sul do Edifício Solar XXI (INETI, 2005)

2.6.3. Sistemas eólicos

O vento é resultante da deslocação de massas de ar originadas por diferenças de pressão atmosférica, que resultam dos diferentes níveis de absorção da energia solar na atmosfera. A energia eólica resulta do aproveitamento da energia cinética do vento que é transformada em energia elétrica através de uma turbina, também designada por aerogerador. O princípio de funcionamento deste sistema consiste na incidência do vento sobre as pás de uma turbina provocando a rotação das mesmas e consequentemente a rotação de um eixo, gerando assim energia mecânica. A rotação do eixo põe em funcionamento o gerador que transforma a energia mecânica em energia elétrica.

Os sistemas de aproveitamento de energia eólica dividem-se em turbinas de eixo horizontal e de eixo vertical (ver Figura 26). Uma turbinas eólicas de eixo horizontal em comparação com um turbinas eólicas de eixo vertical, pode alcançar maior eficiência de energia, aumentando assim a produção de energia e reduzindo a despesa do sistema por kW de energia gerada, mas apenas se a quantidade de energia do vento for alta. A alta turbulência e flutuações do vento e a alta variabilidade direcional podem causar problemas significativos, enquanto que as turbinas eólicas de eixo vertical podem operar bem (Pope, Dincer, & Naterer, 2010). Os sistemas de turbinas de eixo vertical, apresentam algumas desvantagens, tais como a elevada emissão sonora, mais vibrações e pior desempenho em meio urbano. Os sistemas de turbinas de eixo vertical são menos ruidosos e o seu funcionamento não depende da orientação do vento, no entanto são menos eficientes (Portal das Energias Renováveis, 2018).



Figura 26 - Sistemas eólicos: sistema de eixo vertical (esquerda); sistema de eixo horizontal (direita) (inarquia, 2017; Fotovoltaico sulweb, 2018)

Existem turbinas eólicas que podem ser instaladas em paredes exteriores, na cobertura, em elementos da fachada, incluindo janelas ou varandas, dos edifícios, como é o caso do Sistema PowerWindow (Figura 27) (Safaei, Kosasih, kwok, & Jafari, 2015). Este sistema utiliza painéis de lâminas, visualmente semelhantes a estores metálicos, que se movem verticalmente por ação do vento, localizando-se na zona lateral dos painéis o grupo gerador (Safaei, Kosasih, kwok, & Jafari, 2015). A sua conceção modular permite que as turbinas funcionem individualmente ou em paralelo, podendo ser instaladas em grande número, independentemente da geometria exterior dos edifícios (Safaei, Kosasih, kwok, & Jafari, 2015). O sistema PowerWindow é considerado uma forma discreta de integração de turbinas eólicas em ambientes urbanos, encontrando-se em fase experimental (Safaei, Kosasih, kwok, & Jafari, 2015).

Na Figura 27 apresenta-se o protótipo da turbina de eixo vertical TURBan V2.0, instalada no Edifício Solar XXI no campus do LNEG no Lumiar.



Figura 27 - Sistema PowerWindow; Protótipo TURBan V2.0 de 2.0 kW (Engenhariacivil.com, 2013; Estanqueiro & Simões, 2010)

2.6.4. Energia geotérmica

A energia geotérmica, é a energia obtida a partir do calor proveniente do interior do planeta Terra. A energia geotérmica é considerada uma das energias mais limpas e fiáveis no leque de energias renováveis utilizáveis, contudo se não for usado em pequenas zonas onde o calor do interior da Terra vem à superfície através de géiseres e vulcões, então a perfuração dos solos para a introdução de tubagem pode ser dispendiosa, os anti-gelificantes usados nas zonas mais frias são poluentes, apesar de terem uma baixa toxicidade, alguns produzem clorofluorcarbonetos (CFCs) e hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) e este sistema possui um custo inicial elevado (Portal das energias renováveis, 2016).

Devido à necessidade de adquirir energia elétrica de uma forma mais limpa e em quantidades cada vez maiores, foram desenvolvidos modos de usufruir desse calor para a geração de eletricidade. Esta energia sob a forma de calor pode ser utilizada de forma direta através da utilização de reservatórios geotérmicos de temperaturas baixas/moderadas (20°C – 150°C) e de forma indireta, através de centrais geotérmicas e de bombas de calor geotérmicas (Portal das energias renováveis, 2016).

Para extrair a energia do subsolo utilizam-se captadores. Na geotermia, as duas classes de captação mais comuns são a captação horizontal, a mais utilizada, e a captação vertical (Figura 28). Os captadores são colocados no solo (na horizontal ou em furos) e absorvem e transportam para o gerador a energia necessária para a climatização (Rio, 2011).

As principais vantagens da energia geotérmica consistem: ser uma energia renovável, a energia permanece a uma temperatura estável durante as diferentes estações do ano, é de fácil manutenção, possui alto desempenho e o seu impacto visual é mínimo. Contudo, possui algumas desvantagens, tais como, poluir o ar e a água, induzir sismicidade, produzir ruído e ter um custo inicial elevado.

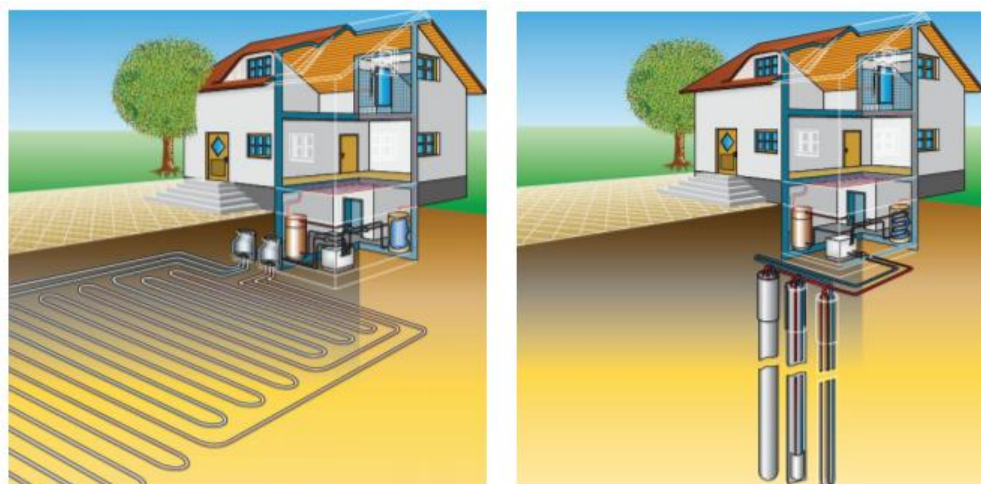


Figura 28 - Captação horizontal (esquerda); captação vertical (direita) (Rio, 2011)

3. METODOLOGIA

3.1. Abordagem metodológica

Este trabalho foi desenvolvido numa escola, que se encontrava em fase de reabilitação. Tendo em conta as características do edifício, foi feito o estudo termo-energético, visando a melhoria da sua eficiência energética e o conforto dos ocupantes, considerando que este é constituído por duas partes, uma sem isolamento térmico na envolvente, que foi alvo de reabilitação, e uma parte com isolamento na envolvente, que não foi alvo de intervenção.

A análise do desempenho termo-energético foi realizada considerando as condições antes e após a implementação da solução de reabilitação no edifício, através de simulação dinâmica (usando o DesignBuilder). A solução implementada consiste num sistema de sistema de isolamento térmico contínuo pelo exterior (4 cm de isolamento e revestimento em granito na zona inferior da parede e 6 cm de isolamento e rebocada nas restantes zonas). Foram também instaladas palas para sombreamento, com 8,30m de comprimento e 1,10m de largura, em algumas zonas. Por fim, foi também definida uma solução de reabilitação visando os nZEB, considerando uma otimização do nível de isolamento térmico e a instalação de painéis solares fotovoltaicos para satisfazer as necessidades energéticas de aquecimento do edifício. Foi também realizada uma breve análise de custos de reabilitação.

3.2. Caracterização do caso de estudo

O edifício em estudo é um edifício escolar, que se encontrava em fase de reabilitação. A escola foi construída em duas fases, a primeira, construída em 1980, destina-se ao ensino básico – 1º ciclo (crianças dos 6 aos 10 anos) e a segunda fase, construída em 2007 destina-se ao jardim de infância (crianças dos 3 aos 6 anos). O edifício encontra-se numa zona urbana, contudo os edifícios e a vegetação próxima deste não provocam sombreamento ao edifício.

3.2.1. Descrição do edifício

A zona do jardim de infância, possui na cobertura plana e nas paredes duplas exteriores, 4cm de isolamento térmico, duas palas de sombreamento nas salas de aula $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ (Figura 30), orientadas a

sul, e a maior área de superfície exterior é envidraçada. A zona do ensino básico – 1º ciclo, possui isolamento térmico na cobertura, de 6cm, não tem palas de sombreamento e as paredes exteriores são duplas, sem isolamento térmico.

O edifício do ensino básico – 1º ciclo é constituído por dois pisos, onde se distribuem os vários espaços:

Piso 0 – três salas de aulas, uma instalação sanitária e dois corredores;

Piso 1 – três salas de aula, três arrecadações, seis instalações sanitárias, um refeitório (espaço polivalente), uma cozinha, a secretaria, a sala do conselho executivo, a sala de expressão plástica e dois corredores.

O edifício do jardim de infância é constituído por um piso, com três salas de aula, duas instalações sanitárias, duas arrecadações, um refeitório, uma cozinha, uma sala para os auxiliares guardarem os seus bens e trocarem de roupa (vestiário), uma sala de reuniões, um corredor. Existem também dois pátios exteriores cobertos.

No edifício (Figura 29 e Figura 30) e nos Anexos, existe uma cozinha na zona do jardim de infância e outra na zona do ensino básico – 1º ciclo, cada uma com um esquentador que abastece um lava loiça. Na escola não são confeccionadas refeições, as cozinhas apenas são utilizadas pontualmente pelos docentes e auxiliares para preparar/aquecer as suas refeições e para a lavagem de loiça são utilizadas as máquinas de lavar, existentes em cada cozinha. Portanto o consumo de água quente no edifício é reduzido, por esta razão não foi considerado consumo de água quente no edifício.

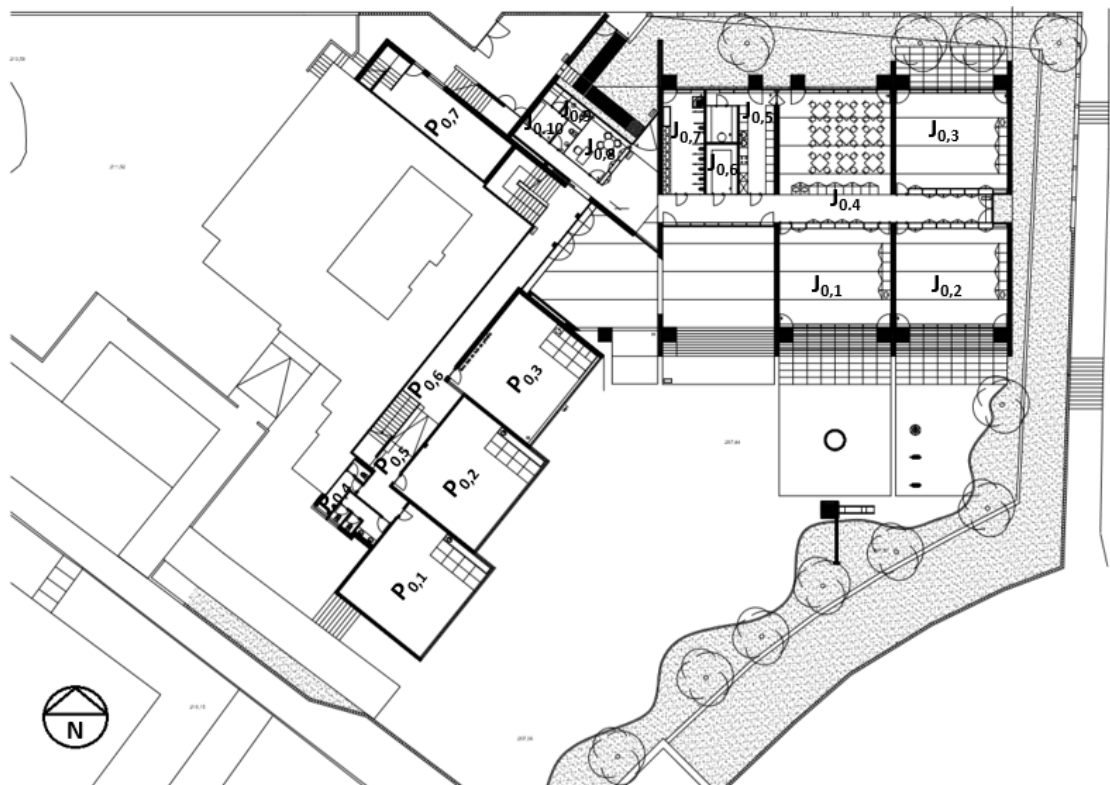


Figura 29 - Planta do piso 0

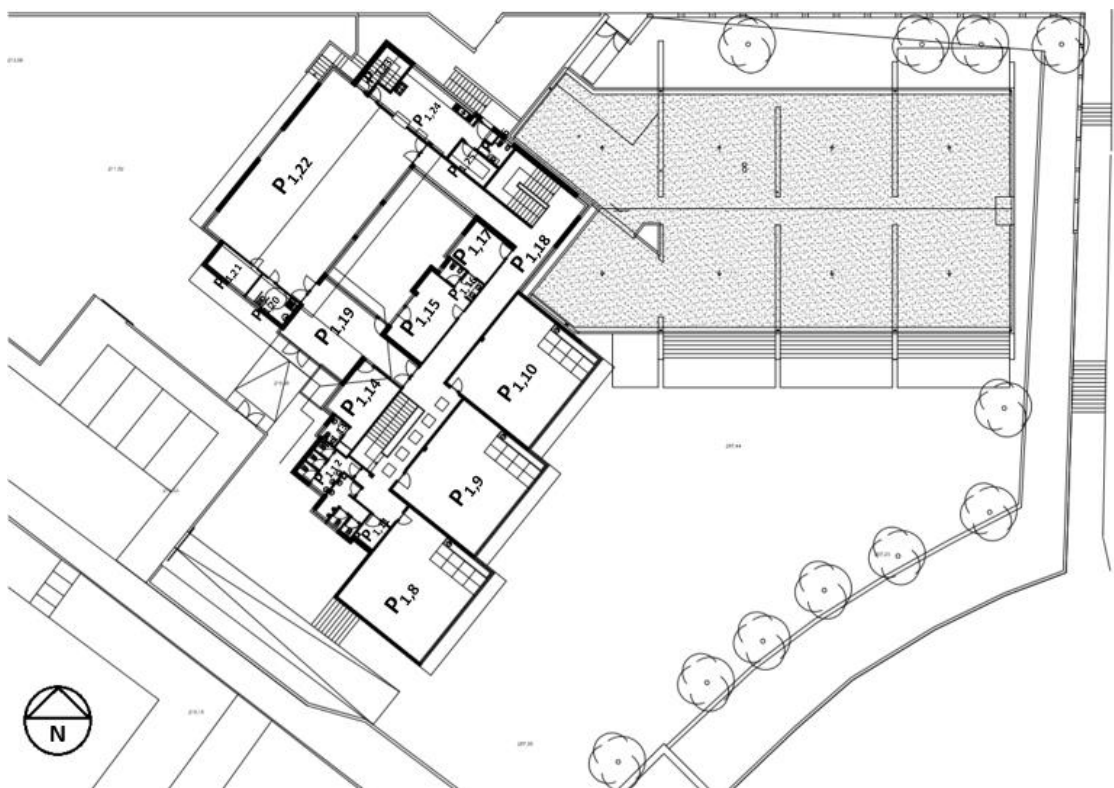


Figura 30 - Planta do piso 1

As áreas e o pé-direito dos compartimentos, para as diferentes valências do edifício estão representados na Tabela 4.

Tabela 4 - Áreas e pé-direito dos compartimentos do edifício

Zonas	Área [m ²]	Pé direito [m]
Ensino básico – 1º ciclo	Salas de aula	59,1
	Refeitório	121,4
	Cozinha	22,0
	Secretaria	16,3
	Sala do conselho executivo	18,8
	Sala de expressão plástica	9,4
	Arrecadação 2	3,8
	Arrecadação 3	5,2
	Corredor 1	34,2
	Corredor 2	54,2
	Corredor 3	32,2
	Corredor 4	90,3
	Hall de entrada	32,7
	Instalação sanitária 1	12,3
	Instalação sanitária 4	17,3
	Instalação sanitária 5	1,8
	Instalação sanitária 6	5,1
	Instalação sanitária 7	6,2
	Instalação sanitária 8	6,4
	Instalação sanitária 9	3,2
Jardim infância	Salas de aula	49,8
	Refeitório/corredor	116,4
	Cozinha	16,7
	Sala de reuniões	9,3
	Vestiário	4,8
	Arrecadação 1	13,6
	Instalação sanitária 2	19,5
	Instalação sanitária 3	3,7

Na zona orientada a sul do edifício, localizam-se as salas de aulas do jardim de infância ($J_{0,1}$, $J_{0,2}$) e orientadas a sudeste estão as salas de aulas da primária ($P_{0,1}$, $P_{0,2}$, $P_{0,3}$, $P_{1,8}$, $P_{1,9}$ e $P_{1,10}$). A entrada principal da zona do jardim de infância encontra-se orientada a nordeste, enquanto que a entrada principal do ensino básico – 1º ciclo se encontra orientada a sudoeste.

3.2.2. Soluções construtivas - Elementos opacos

A cobertura da zona do jardim de infância (Figura 31) é uma cobertura plana constituída por seixo rolado de 6,4cm, manta geotêxtil de 0,4cm, isolamento de poliestireno extrudido de 4,0cm, impermeabilização em poliéster de 0,9cm, camada de forma de 4cm, laje aligeirada de 30,0cm e teto falso, e caixa de ar, de 21cm, com 6cm de isolamento de lã de rocha, e placa de gesso cartonado com 1,3cm. A cobertura da zona do ensino básico – 1º ciclo (Figura 32) é uma cobertura inclinada, constituída por chapas painel sanduiche com 6,1cm de espessura, com espaço de ar, laje aligeirada com 20cm, teto falso com caixa de ar com 10cm e uma placa de gesso cartonado com 1,3cm.

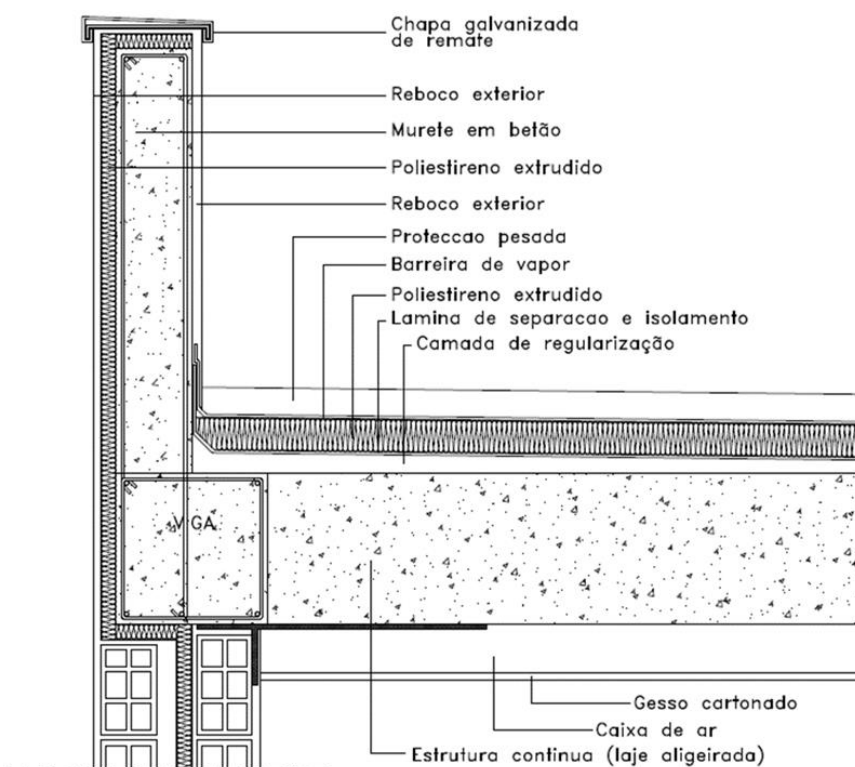


Figura 31 - Pormenor construtivo tipo da cobertura da zona do jardim de infância

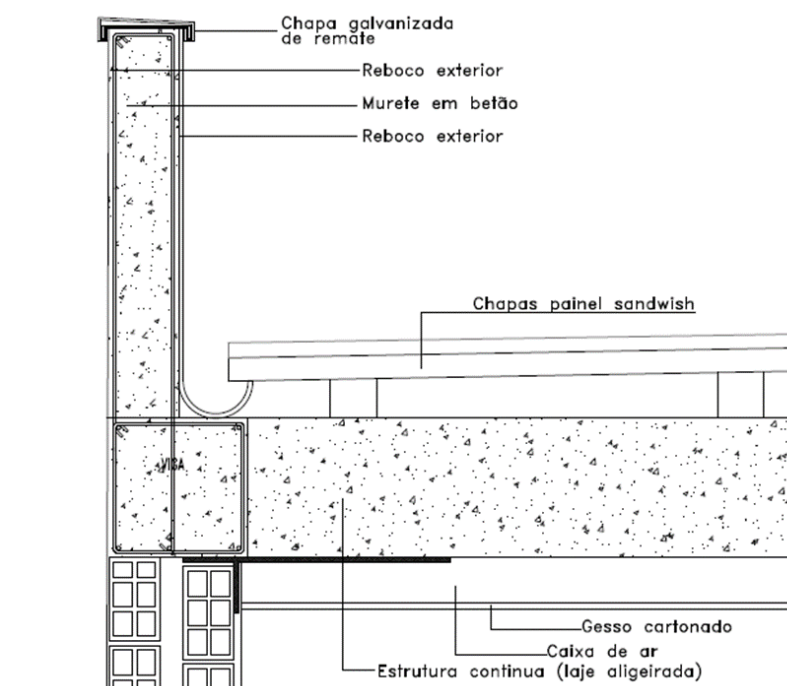


Figura 32 - Pormenor construtivo tipo da cobertura da zona do ensino básico – 1º ciclo

As paredes exteriores da zona do jardim de infância e da zona do ensino básico – 1º ciclo são paredes duplas constituídas por tijolo cerâmico vazado de 11 + 11cm, reboco de 3cm e caixa de ar de 8cm na zona do jardim de infância, reboco de 2,0cm e caixa de ar de 8cm, na zona do ensino básico – 1º ciclo. As paredes da zona do jardim de infância contêm 4cm de isolamento térmico de poliestireno extrudido na caixa de ar, enquanto que as da zona do ensino básico – 1º ciclo não possuem isolamento térmico (ver Figura 33).

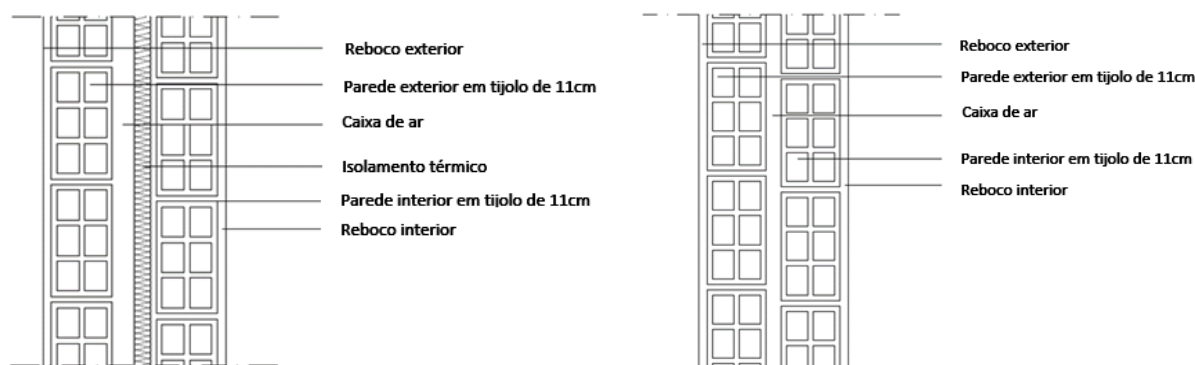


Figura 33 - Pormenor construtivo tipo das paredes exteriores da zona do jardim de infância (esquerda); pormenor construtivo tipo das paredes exteriores e paredes interiores, do tipo I, da zona do ensino básico – 1º ciclo (direita)

As paredes interiores na zona do ensino básico – 1º ciclo são constituídas por tijolo cerâmico vazado de 11cm com um acabamento em reboco de 2,0cm, em ambas as faces. Na zona do jardim de infância existem dois tipos de paredes interiores, as paredes interiores do Tipo I (paredes duplas), representadas na Figura 34, são constituídas por tijolo cerâmico vazado de 11cm, caixa de ar de 8cm, isolamento térmico (XPS) de 4cm, e acabamento em reboco de 3cm, e as paredes interiores do Tipo II são constituídas por gesso cartonado (1,3cm) com 15cm de lã de rocha na caixa de ar (ver Figura 34). As paredes interiores do Tipo I são as que separam as salas de aula J_{0,1} e J_{0,2}, a sala de aula J_{0,3} e o refeitório, J_{0,4}, o refeitório, J_{0,4}, e a cozinha, J_{0,5}, e umas das paredes da instalação sanitária 2, J_{0,7}, e o refeitório/corredor, J_{0,4}. As paredes interiores do Tipo II são as restantes paredes interiores do jardim de infância.

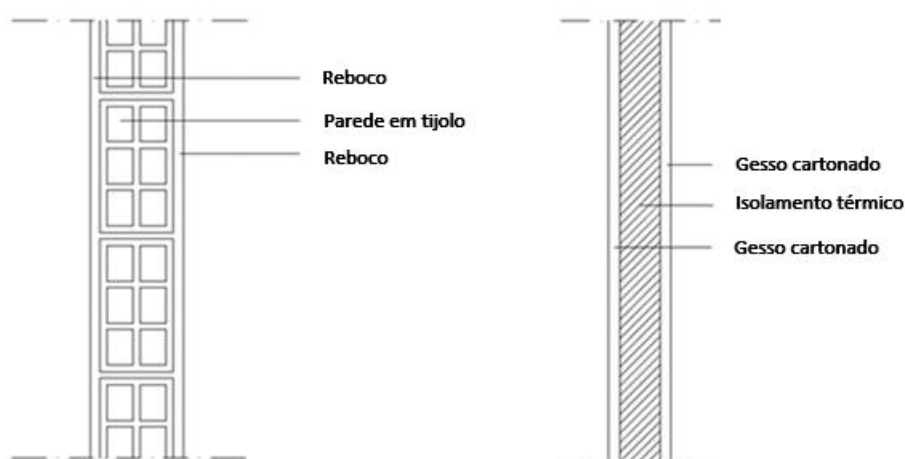


Figura 34 - Pormenor construtivo tipo das paredes interiores da zona do ensino básico – 1º ciclo (esquerda); pormenor construtivo tipo das paredes interiores do tipo II (direita)

As paredes em contacto com o solo são constituídas por granito de 15cm, caixa de ar de 12cm, tijolo cerâmico vazado de 11cm e reboco de 2,0cm (ver Figura 35).

O pavimento intermédio da zona do ensino básico – 1º ciclo (Figura 35) é constituído por um revestimento em madeira de 2,5cm, camada de regularização de 4cm, laje aligeirada de 20cm, caixa de ar de 6cm e gesso cartonado de 1,3cm. O pavimento térreo, das duas zonas, do edifício (Figura 36) é constituído por um revestimento em madeira de 2,5cm, camada de regularização de 4cm, laje aligeirada de 30cm e um desvão sanitário de 20cm.

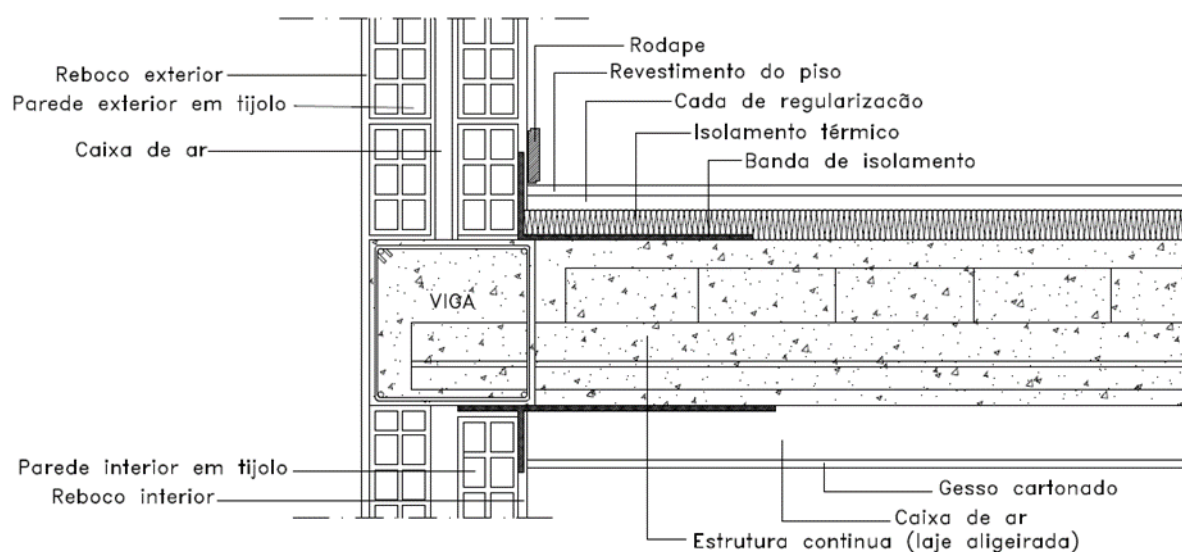


Figura 35 - Pormenor construtivo tipo do piso intermédio da zona do ensino básico – 1º ciclo

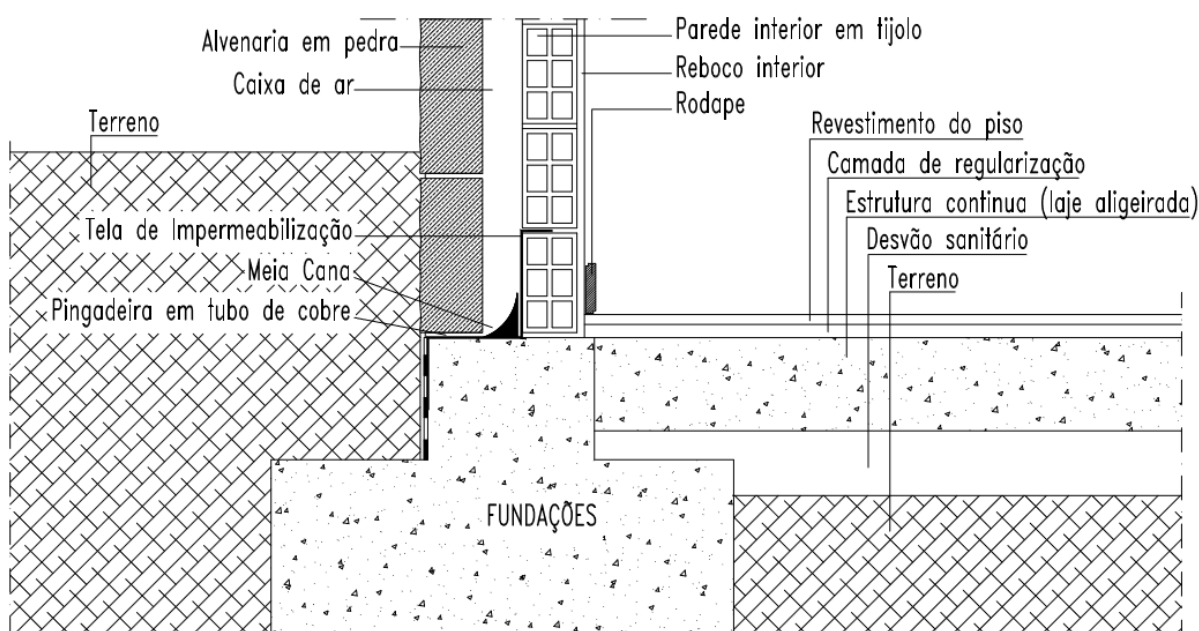


Figura 36 - Pormenor construtivo tipo do piso térreo e das paredes em contacto com o solo do edifício

Nas Tabelas 5 e 6, estão listadas as características dos materiais e o coeficiente de condutividade térmica (U) de cada elemento construtivo, para as zonas do jardim de infância e do ensino básico – 1º ciclo. Os valores utilizados da condutividade térmica e da densidade dos materiais constituintes dos elementos construtivos, são os indicados na base de dados do DesignBuilder.

Tabela 5 - Características dos materiais constituintes dos elementos construtivos da zona do jardim de infância

Zona do jardim de infância				
Elementos construtivos	Materiais	Espessuras (cm)	Condutividade de térmica [W/(m².K)]	Densidade [kg/m³]
Cobertura plana U=0,20 W/(m².K)	Seixo rolado	6,4	-	-
	Manta geotêxtil	0,4	0,190	1200
	Poliestireno extrudido (XPS)	4,0	0,034	35
	Impermeabilização poliéster	0,9	0,190	1400
	Camada de forma	4,0	0,720	1650
	Laje aligeirada	30,0	0,380	1200
	Caixa de ar	21,0	-	-
	Lã de rocha	6,0	0,038	140
	Gesso cartonado	1,3	0,250	900
Paredes exteriores U=0,42 W/(m².K)	Reboco	3,0	0,720	1860
	Tijolo vazado	11,0	0,300	1000
	Caixa de ar	8,0	-	-
	Poliestireno extrudido (XPS)	4,0	0,034	35
	Tijolo Vazado	11,0	0,300	1000
	Reboco	3,0	0,720	1860
Paredes interiores do tipo I U=0,42 W/(m².K)	Reboco	3,0	0,720	1860
	Tijolo vazado	11,0	0,300	1000
	Caixa de ar	8,0	-	-
	Poliestireno extrudido (XPS)	4,0	0,034	35
	Tijolo Vazado	11,0	0,300	1000
	Reboco	3,0	0,720	1860
Paredes interiores do tipo II U=1,51 W/(m².K)	Gesso cartonado	1,3	0,250	900
	Lã de rocha	15,0	0,038	140
	Gesso cartonado	1,3	0,250	900
Pavimento térreo U=0,43 W/(m².K)	Madeira	2,5	0,120	510
	Camada de regularização com malhasol	4,0	0,720	1650
	Laje aligeirada	30,0	0,380	1200
	Desvão sanitário	20,0	-	-
*nota: dados obtidos no programa (DesignBuilder)				

Tabela 6 - Características dos materiais constituintes dos elementos construtivos da zona do ensino básico – 1º ciclo

Zona do ensino básico – 1º ciclo				
Elementos construtivos	Materiais	Espessuras (cm)	Condutividade e térmica [W/(m².K)]	Densidade [kg/m³]
Cobertura U=0,31 W/(m².K)	Alumínio	0,05	160,0	2800
	Poliuretano (PUR)	6,0	0,026	35
	Alumínio	0,05	160,0	2800
	Laje aligeirada	20,0	0,380	1200
	Caixa de ar	10,0	-	-
	Gesso cartonado	1,3	0,250	900
Paredes exteriores U=0,90 W/(m².K)	Reboco	2,0	0,720	1860
	Tijolo vazado	11,0	0,300	1000
	Caixa de ar	8,0	-	-
	Tijolo vazado	11,0	0,300	1000
	Reboco	2,0	0,720	1860
Paredes interiores U=1,47 W/(m².K)	Reboco	2,0	0,720	1860
	Tijolo vazado	11,0	0,300	1000
	Reboco	2,0	0,720	1860
Paredes em contacto com o solo U=1,26 W/(m².K)	Granito	15,0	2,800	2600
	Caixa de ar	12,0	-	-
	Tijolo vazado	11,0	0,300	1000
	Reboco	2,0	0,720	1860
Pavimento intermédio U=0,78 W/(m².K)	Madeira	2,5	0,120	510
	Camada de regularização com malhasol	4,0	0,720	1650
	Laje aligeirada	20,0	0,380	1200
	Caixa de ar	6,0	-	-
	Gesso cartonado	1,3	0,250	900
Pavimento térreo U=0,43 W/(m².K)	Madeira	2,5	0,120	510
	Camada de regularização com malhasol	4,0	0,720	1650
	Laje aligeirada	30,0	0,380	1200
	Desvão sanitário	20,0	-	-
Cobertura U=1,07 W/(m².K)	Camada de regularização com malhasol	4,0	0,720	1650
	Laje aligeirada	20,0	0,380	1200
	Caixa de ar	6,0	-	-
	Gesso cartonado	1,3	0,250	900

*nota: dados obtidos no programa (DesignBuilder)

3.2.3. Envidraçados e portas

As características dos envidraçados e das portas constituintes do edifício são as apresentadas na Tabela 7. Os envidraçados não possuem qualquer proteção exterior, tendo no interior uma tela de proteção translúcida.

Tabela 7 - Características dos envidraçados e das portas do edifício

	Características	U [W/(m ² .K)]	g_{\perp}
Janelas exteriores	Caixilharia de alumínio (5cm) com vidro duplo incolor de 3mm e caixa de ar de 13mm	1,96	0,691
Claraboias	Caixilharia de alumínio (5cm) com vidro incolor 3mm, com caixa de ar 6mm e vidro claro 3mm	2,18	0,618
Portas exteriores	Caixilharia de alumínio (5cm) com vidro simples de 5mm	3,65	-
Portas interiores	Carvalho pintado 35mm	2,82	-

3.2.4. Perfis de ocupação, iluminação e equipamentos

A zona do ensino básico – 1º ciclo está encerrada nos meses de julho e agosto e a zona do jardim de infância apenas se encontra encerrado no mês de agosto. A escola encerra aos fins de semana, e o horário escolar tem início às 8:00h e termina às 19:00h.

Nas zonas de circulação e nos locais pouco utilizados como (corredores, instalações sanitárias e arrecadações), não foi considerada ocupação. As duas cozinhas do edifício, são utilizadas pelos docentes e auxiliares para preparar/aquecer as próprias refeições, não existindo confeção de refeições para os alunos no local, pelo que foi considerada ocupação pontual e como a utilização de águas quentes sanitárias é reduzida esta não foi considerada. A sala do conselho executivo e a sala de reuniões têm também uma utilização pontual. Nos restantes espaços foi considerado ocupação, de acordo com o tipo de utilização definido no local. Na Tabela 8 estão indicados os períodos de utilização correspondentes a cada espaço. A taxa metabólica utilizada foi de 60W/pessoa, tendo em consideração o tipo de atividade desempenhada pelas crianças (sentado a ler ou a escrever) (ASHRAE 55, 2017). O fator metabólico

utilizado foi 0,75, por se tratar de crianças não sendo considerado o número de adultos, visto que na maioria dos espaços o número de crianças é superior ao de adultos.

Tabela 8 - Tipo de espaço e período de utilização correspondente a cada espaço

	Espaços	Período de utilização
Ensino básico – 1º ciclo	Salas de aula	8:00h - 12:00h 14:00h - 18:00h
	Refeitório	12:00 - 14:00h
	Cozinha	Pontual
	Secretaria	9:00h - 12:00h 14:00h - 17:00h
	Sala do conselho executivo	Pontual
	Sala de expressão plástica	8:00h - 12:00h 14:00h - 18:00h
Jardim de infância	Salas de aula	8:00h - 12:00h 14:00h - 18:00h
	Refeitório/corredor	Pontual
	Cozinha	Pontual
	Sala de reuniões	Pontual
	Vestiário	Pontual

O número de ocupantes foi definido tendo em conta a área de cada espaço, considerando a ocupação padrão. Quanto ao efeito isolante conferido pelo vestuário dos utilizadores, foi utilizada uma resistência térmica de 1,0clo para o vestuário típico de inverno e de 0,5clo para o vestuário típico de verão (EN 15251, 2006). Na Tabela 9 está representada a ocupação dos espaços do edifício.

O edifício possui lâmpadas fluorescentes tubulares, estas encontram-se encastradas. Tendo em conta a área de cada espaço e as necessidades de iluminação respetivas, foi definido o número de lâmpadas utilizadas.

Relativamente aos equipamentos foi considerado que existe um computador portátil (normalmente utilizado pelo professor), em cada sala de aula e na sala de expressão plástica, na secretaria foi considerando que existem três computadores. Nas duas cozinhas da escola foi considerado que existe um micro-ondas uma máquina de café automática, um fogão a gás de duas bocas e um esquentador, tendo estes equipamentos uma utilização pontual. Nos dois refeitórios não existe qualquer equipamento elétrico.

Tabela 9 - Ocupação de cada espaço

	Espaços	Área [m²]	Nº de pessoas	Ocupação [pessoas/m²]
Ensino básico – 1º ciclo	Salas de aula	59,1	20	0,34
	Refeitório	121,4	150	1,24
	Cozinha	22,0	5	0,23
	Secretaria	16,3	3	0,18
	Sala do conselho executivo	18,8	6	0,32
	Sala de expressão plástica	9,4	8	0,85
Jardim de infância	Salas de aula	49,8	16	0,32
	Refeitório/corredor	116,4	60	0,52
	Cozinha	16,7	5	0,30
	Sala de reuniões	9,3	13	1,40
	Vestiário	4,8	8	1,66

Os ganhos internos, devido à ocupação, iluminação e equipamentos do edifício considerados foram de 7 W/m², de acordo com o recomendado pelo CIBSE Guide A: Environmental Design Chapter 6 Internal Heat Gains (CIBSE, 2015). Para os espaços onde foi considerado ocupação pontual, uma vez que não têm equipamentos em funcionamento permanente e o contributo da iluminação é reduzido (incluindo a cozinha) não foram considerados ganhos internos (CIBSE, 2015).

3.2.5. Trocas por ventilação

O edifício escolar não possui qualquer tipo de sistema de ventilação mecânica, existindo apenas trocas de ar entre o edifício e o exterior através de ventilação natural. Com vista a assegurar o bem-estar dos ocupantes são estabelecidos por portaria os valores mínimos de caudal de ar novo por espaço em função da ocupação, das características do próprio edifício e dos sistemas de climatização, tal como os limiares de proteção para as concentrações de poluentes de ar interior.

Para os espaço do edifício com ocupação foi considerado o caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devido à ocupação, de 24 m³/(h.pessoa), tendo em consideração o tipo de atividade (sedentária) (Portaria n.º 353-A, 2013). Para os espaços sem ocupação foi considerada uma taxa mínima de ventilação de 0,3 l/(s.m²), tendo em conta a categoria dos espaços, que neste caso se trata de espaços multiusos (ASHRAE STANDARD 62.1, 2007). Para os espaços sem ocupação, o valor

da taxa de renovação de ar é de 0,37 rph para o ensino básico – 1º ciclo e de 0,33 rph para o jardim de infância. Na Tabela 10, estão indicadas as taxas de renovação de ar por hora dos espaços com ocupação.

Tabela 10 - Taxa de renovação de ar por hora dos espaços com ocupação

	Espaços	Volume [m³]	Taxa de renovação de ar [rph]
Ensino básico – 1º ciclo	Salas de aula	173,70	2,76
	Sala de expressão plástica	27,58	6,96
	Refeitório	558,49	6,45
	Secretaria	47,80	1,51
Jardim de infância	Salas de aula	164,47	2,33
	Refeitório/corredor	383,99	3,75

3.2.6. Sistemas de aquecimento e arrefecimento

O edifício não possui sistema de arrefecimento, e o sistema de aquecimento é assegurado por um conjunto de radiadores elétricos de acumulação. Para análise do desempenho do edifício, foram determinadas as necessidades energéticas, considerando o sistema “Ideal Loads” no DesignBuilder (com um Coeficiente de Desempenho (COP) = 1 e um Índice de Eficiência de Energia (EER) = 1), pois não se conhecem as características e perfil de utilização dos radiadores e é possível que estes não garantam as necessidades de aquecimento do edifício.

3.3. Desempenho termo-energético

Para a modulação e posteriormente análise do desempenho termo-energético do edifício foi utilizado o programa de simulação dinâmica DesignBuilder. O DesignBuilder é o primeiro interface para o programa de simulação energética EnergyPlus, e possui uma plataforma de modelação de edifícios em 3D de fácil manipulação (Natural Works, 2014).

O primeiro parâmetro de entrada do programa, é a localização do edifício e os respetivos dados climáticos. O programa contém alguns ficheiros climáticos (nacionais), para diferentes países e para diferentes zonas dentro de cada um desses países, fornecidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Para o estudo, foi utilizado o ficheiro climático do Porto (Pedras Rubras) (latitude de 41,23°, uma longitude de -8,68° e uma altitude de 77m).

O edifício escolar foi modelado no DesignBuilder de acordo com o projeto de arquitetura (ver Figura 37), permitindo numa fase posterior introduzir todas as suas características, desde pormenores construtivos, perfis de utilização, equipamentos, iluminação, atividade, entre outros, correspondentes a cada zona.

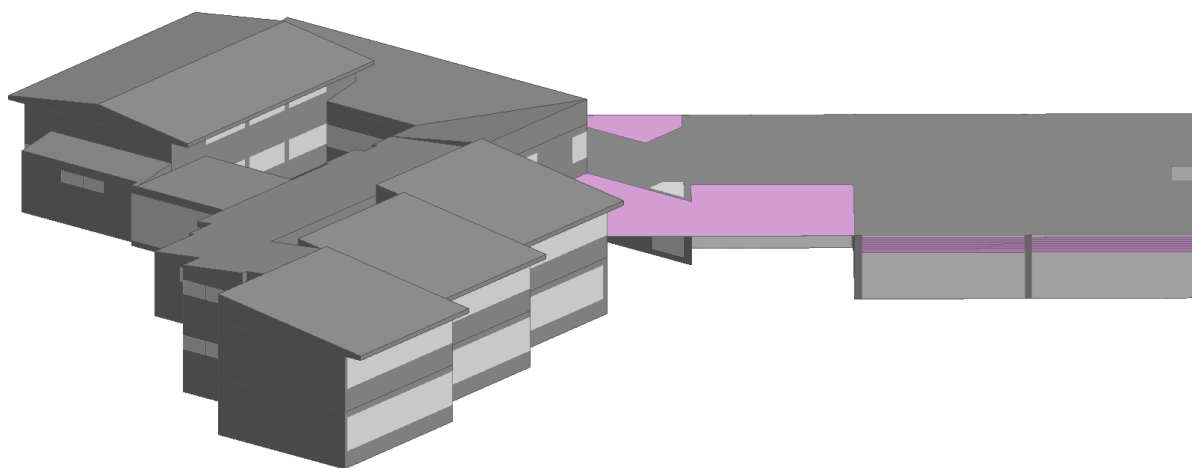


Figura 37 - Modelo geométrico 3D do edifício escolar

Uma das vantagens do DesignBuilder é permitir a divisão de um sólido em diversos espaços, criando desta forma as diferentes zonas térmicas. O piso 0 foi compartimentado, de acordo com o projeto de arquitetura, em 17 zonas térmicas, e o piso 1 em 19 zonas térmicas (ver Figura 38 e 39).

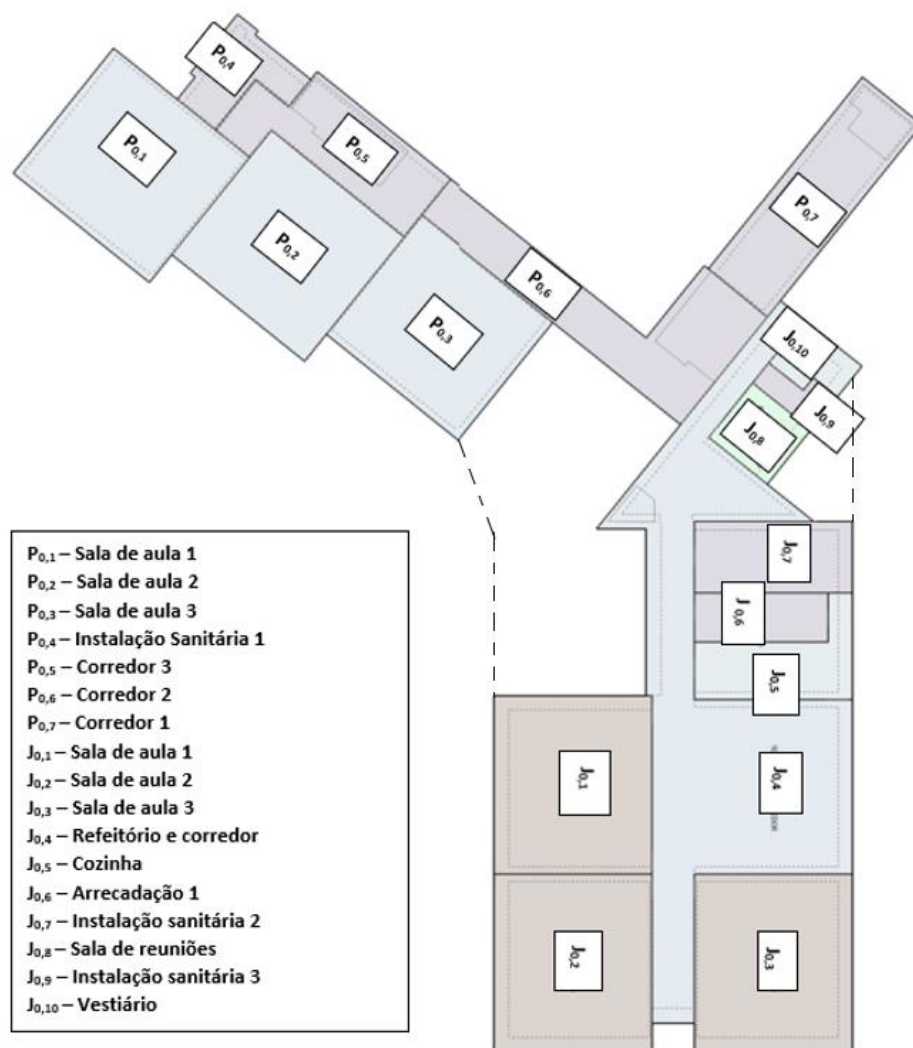


Figura 38 - Modelo do piso 0 do edifício

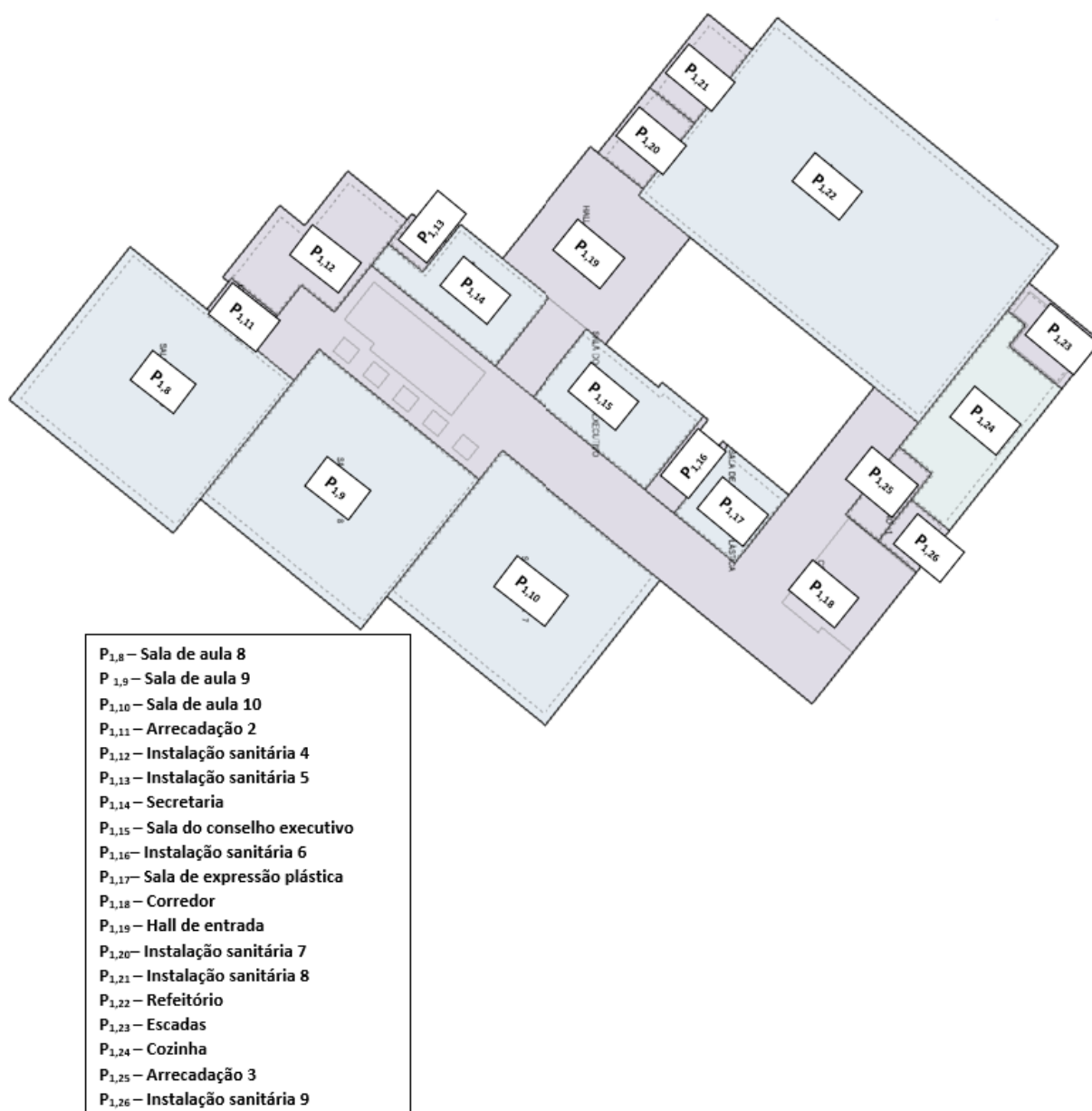


Figura 39 - Modelo do piso 1 do edifício

3.4. Conforto térmico dos ocupantes

Além da análise do desempenho energético do edifício foi também realizada a análise da situação de conforto térmico dos ocupantes das salas de aulas. Para tal, foi utilizado o modelo de conforto térmico adaptativo e o método da zona de conforto, definido na norma ASHRAE 55 (ASHRAE 55, 2017).

Na ASHRAE 55 é apresentado um modelo gráfico de conforto térmico adaptativo (Figura 40), que relaciona a temperatura operativa interna (t_o), em função da temperatura média do ar exterior

predominante ($\overline{t_{pma(out)}}$), que deve basear-se em não menos de sete e não mais de trinta dias sequenciais anteriores ao dia em questão (ASHRAE 55, 2017).

Para definição da zona de conforto do modelo gráfico foram estabelecidas equações que correspondem à temperatura operacional aceitável para as faixas da Figura 40, tais como: Limite superior aceitável de 80% ($^{\circ}\text{C}$) = $0.31 \overline{t_{pma(out)}} + 21.3$ e Limite inferior aceitável de 80% ($^{\circ}\text{C}$) = $0.31 \overline{t_{pma(out)}} + 14.3$.

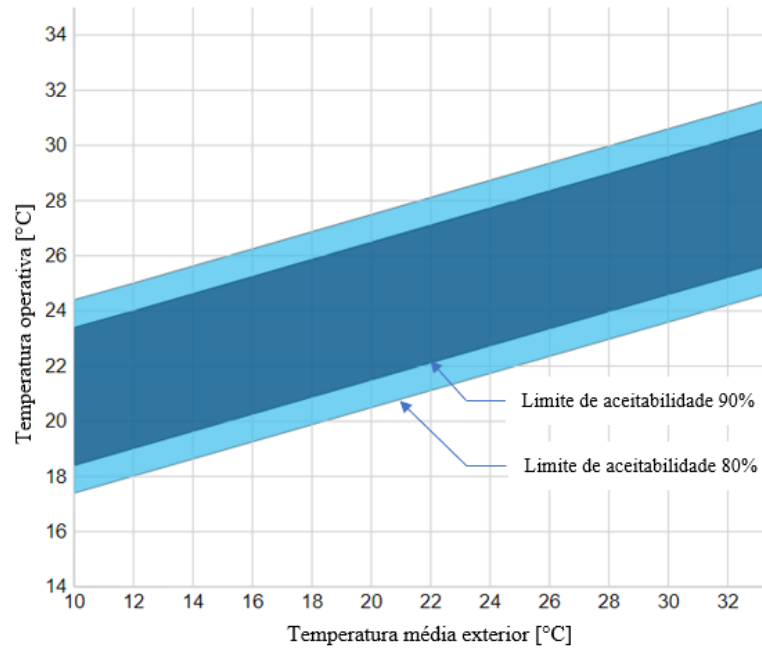


Figura 40 - Modelo adaptativo de conforto térmico (Matias, 2010)

A utilização do método da zona de conforto deve ser limitada a ocupantes representativos com taxas metabólicas entre 1,0 e 1,3 met e isolamento do vestuário entre 0,5 e 1,0 clo não expostos à radiação solar direta e a velocidade média do ar deve ser inferior a 0,2 m/s, tal como o caso do edifício. A zona de conforto na Figura 41, é limitada a uma taxa de humidade igual ou inferior a 0,012kg. H₂O/kg de ar seco, que corresponde a uma pressão de vapor de água de 1,910kPa (0,277 psi) à pressão padrão ou a uma temperatura do ponto de orvalho tdp de 16,8°C (ASHRAE 55, 2017).

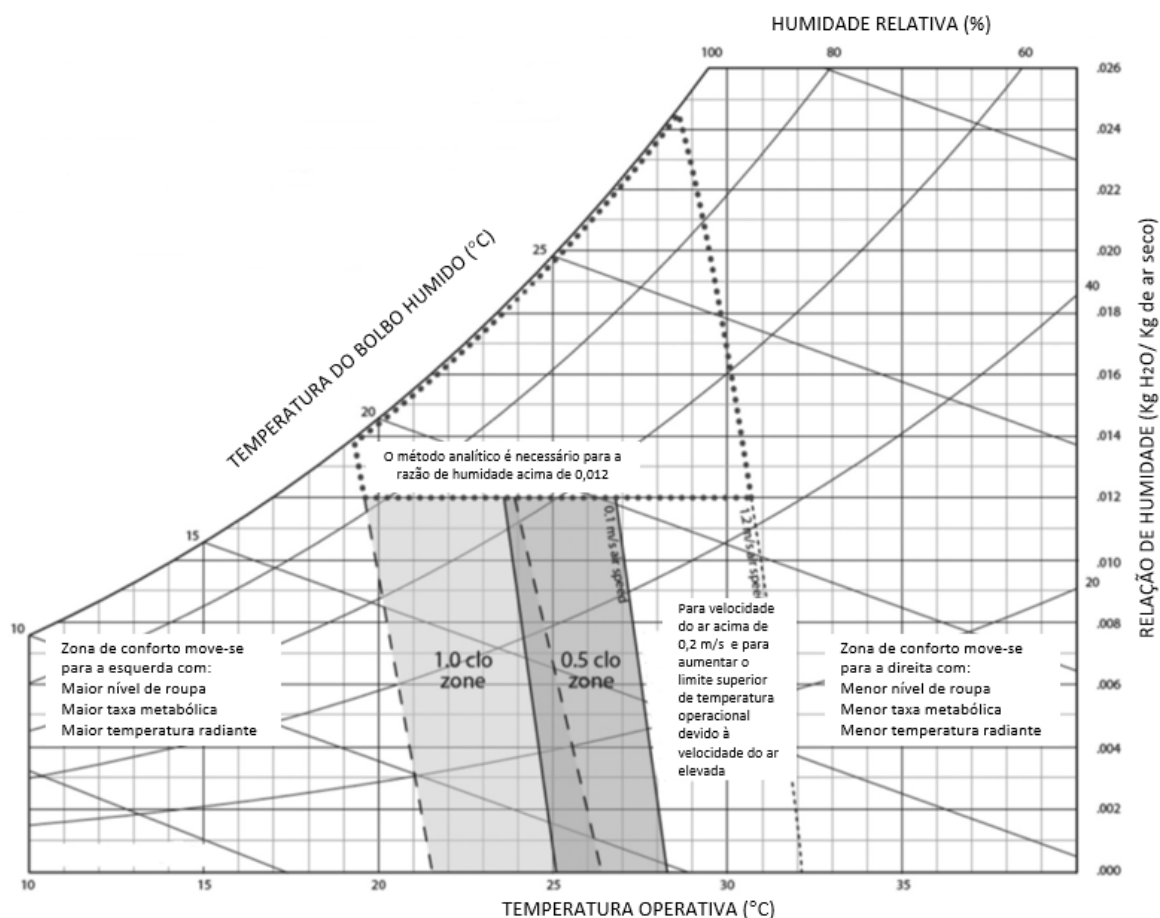


Figura 41 - Método da zona de conforto (ASHRAE 55, 2017)

3.5. Caracterização das soluções de reabilitação

A solução de reabilitação implementada, na zona do ensino básico – 1º ciclo, consiste na colocação de um sistema de sistema de isolamento contínuo pelo exterior (Sistema ETICS, 4 cm de poliestireno expandido e revestimento em granito na zona inferior da parede e 6 cm de poliestireno expandido rebocada nas restantes zonas), e na instalação de palas para sombreamento, nas salas de aulas $P_{0,1}$, $P_{0,2}$ e $P_{0,3}$. A zona do jardim de infância não foi intervencionada, uma vez que possui isolamento térmico de 4cm nas paredes exteriores. Na Tabela 11, estão listadas as características dos materiais e o coeficiente de condutividade térmica (U) de cada elemento construtivo, para a solução de reabilitação implantada.

A solução proposta para melhorar o conforto termo-energético do edifício, atingindo assim um nível de edifício nZEB, consistiu na aplicação de um sistema ETICS com 8 cm de isolamento em toda a envolvente da zona do ensino básico – 1º ciclo, um aumento do sistema de isolamento, para 8cm, de toda e

envolvente do jardim de infância, um aumento para 15cm de isolamento térmico na cobertura plana do edifício do jardim de infância, e um aumento para 16cm de isolamento térmico na cobertura inclinada do edifício do ensino básico – 1º ciclo, e a instalação de seis palas de sombreamento, nas salas de aulas, orientadas a sudeste, do piso 0 e do piso 1 do edifício do 1º ciclo. Na Tabela 12, estão listadas as características dos materiais e o coeficiente de condutividade térmica (U) de cada elemento construtivo, para a solução de reabilitação nZEB.

Tabela 11 - Características dos materiais constituintes dos elementos construtivos da solução de reabilitação implementada

		Solução de reabilitação implementada			
	Elementos construtivos	Materiais	Espessuras (cm)	Condutividade térmica [W/(m².K)]	Densidade [kg/m³]
Ensino básico – 1º Ciclo	Paredes exteriores U=0,42 W/(m².K)	Reboco	2,0	0,720	1860
		Tijolo vazado	11,0	0,300	1000
		Caixa de ar	8,0	-	-
		Tijolo vazado	11,0	0,300	1000
		Reboco	2,0	0,720	1860
		Poliestireno expandido (EPS)	4,0/6,0	0,04	15
		Argamassa de cimento	2,0	0,720	1650
		Gesso cimento com areia agregada	3,0	0,720	1860
*nota: dados obtidos no programa (DesignBuilder)					

Para calcular a produção mensal de um sistema solar fotovoltaico, utilizou-se a ferramenta informática PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), tendo em conta os dados padrão de um painel fotovoltaico, ou seja, as dimensões do painel são de $1,700 \times 1,016 \text{ m}^2$ (com 60 células), as células fotovoltaicas são de silício cristalino. O painel tem uma eficiência energética (do módulo) de 22%, deve ser instalado na cobertura do edifício, com orientação sul e 35° de inclinação. A análise foi realizada, considerando o edifício localizado no Porto (Pedras Rubras, latitude de $41,23^\circ$ e longitude de $-8,68^\circ$). Para atingir o nível de um edifício nZEB, ou seja, com uma redução das necessidades energéticas anuais, igual ou superior a 75%, em relação ao edifício sem qualquer solução de reabilitação, são necessários 62 painéis fotovoltaicos (um painel fotovoltaico produz 618kWh.ano).

Tabela 12 - Características dos materiais constituintes dos elementos construtivos da solução de reabilitação para atingir um edifício nZEB

Solução de reabilitação para atingir um edifício nZEB					
	Elementos construtivos	Materiais	Espessuras (cm)	Condutividade térmica [W/(m².K)]	Densidade [kg/m³]
Ensino básico – 1º Ciclo	Cobertura U=0,15 W/(m².K)	Alumínio	0,05	160,0	2800
		Poliuretano (PUR)	16,0	0,026	35
		Alumínio	0,05	160,0	2800
		Laje aligeirada	20,0	0,380	1200
		Caixa de ar	10,0	-	-
		Gesso cartonado	1,3	0,250	900
	Paredes exteriores U=0,32 W/(m².K)	Reboco	2,0	0,720	1860
		Tijolo vazado	11,0	0,300	1000
		Caixa de ar	8,0	-	-
		Tijolo vazado	11,0	0,300	1000
		Reboco	2,0	0,720	1860
		Poliestireno expandido (EPS)	8,0	0,04	15
		Argamassa de cimento	2,0	0,720	1650
		Gesso cimento com areia agregada	3,0	0,720	1860
Jardim de infância	Cobertura plana U=0,14 W/(m².K)	Seixo rolado	6,4	-	-
		Manta geotêxtil	0,4	0,190	1200
		Poliestireno extrudido (XPS)	15,0	0,034	35
		Impermeabilização poliéster	0,9	0,190	1400
		Camada de forma	4,0	0,720	1650
		Laje aligeirada	30,0	0,380	1200
		Caixa de ar	21,0	-	-
		Lã de rocha	6,0	0,038	140
		Gesso cartonado	1,3	0,250	900
	Paredes exteriores U=0,28 W/(m².K)	Reboco	3,0	0,720	1860
		Tijolo vazado	11,0	0,300	1000
		Caixa de ar	8,0	-	-
		Poliestireno extrudido (XPS)	8,0	0,034	35
		Tijolo Vazado	11,0	0,300	1000
		Reboco	3,0	0,720	1860

*nota: dados obtidos no programa (DesignBuilder)

As características e dimensões das palas de sombreamento utilizadas, na zona do ensino básico – 1º ciclo, foram iguais às da zona do jardim de infância, para manter as características estéticas do edifício, ou seja, as palas de sombreamento são fixas com 8,30m de comprimento e 1,10m de largura, de alumínio, montadas em posição horizontal, formada por lâminas fixas com 8,30m de comprimento e 0,3m de largura, variando apenas o ângulo de inclinação das lâminas, as do jardim de infância têm uma inclinação de 90°C e as do ensino básico – 1º ciclo têm uma inclinação de 45°. Para a solução de reabilitação nZEB, utilizaram-se as espessuras de isolamento térmico mais adequadas, tendo em conta uma metodologia para a análise de custo ótimo de soluções de reabilitação, num edifício residencial característico do parque edificado de Portugal (Almeida, Ferreira, & Rodrigues, 2013), visto que há falta de estudos relativos a edifícios de serviços e em particular para edifícios escolares.

3.6. Análise de custos

Para a análise dos custos das soluções de reabilitação, utilizou-se o gerador de preços para construção civil em Portugal, que é uma base de dados que permite obter o preço para o artigo escolhido atendendo aos materiais, equipamentos e processos construtivos selecionados, para determinar o custo do tipo de solução de reabilitação, que inclui o custo do material, mão de obra e manutenção durante 10 anos, e não inclui a substituição no fim do ciclo de vida e aquisição de novo equipamento, tendo em conta a área de intervenção das soluções. A determinação do período de retorno do investimento das duas soluções de reabilitação, foi realizada, tendo em conta a redução das necessidades energéticas (1kWh custa 0,19€) e o seu respetivo custo.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Desempenho térmico do edifício antes de reabilitação - sem sistema AVAC ativo

A análise das condições térmicas foi realizada apenas para as salas de aula, porque são os espaços úteis utilizados durante o maior período de tempo e pelo maior número de ocupantes, principalmente crianças, em função das diferenças associadas a cada sala (orientação, características da envolvente e ocupação).

No caso de estudo, após uma análise geral dos resultados obtidos, verifica-se, durante o período de ocupação, que junho e julho correspondem aos meses mais quentes e janeiro ao mês mais frio do período de ocupação, a semana mais quente inicia a 16 de junho e a semana mais fria inicia a 20 de janeiro.

De modo a não conduzir a desconforto térmico de inverno considerou-se uma velocidade do ar inferior a 0,2m/s e no verão de no máximo 0,8m/s (ASHRAE 55, 2017).

Para realizar a análise do desempenho energético do edifício em estudo, foi considerado um sistema AVAC simples, com um coeficiente de desempenho igual a um e uma temperatura máxima de insuflação de 28°C para aquecimento e para arrefecimento um coeficiente de desempenho igual a um e uma temperatura mínima de insuflação de 12°C.

Os valores recomendados da temperatura interior utilizados foram os definidos na norma EN 15251 (EN 15251, 2006), sendo a temperatura mínima no inverno de 20°C e a temperatura máxima no verão de 26°C, tendo em conta que é um edifício de Categoria II por se encontrar em fase de reabilitação.

De modo a assegurar as condições de conforto o sistema AVAC começa a funcionar às oito horas e é desligado às dezanove horas, ou seja, funciona durante todo o período de ocupação da escola, pois as crianças são mais sensíveis à temperatura e a sua capacidade de aprendizagem depende das condições térmicas das salas de aulas.

O estudo foi realizado para duas situações: considerando que o sistema AVAC não está em funcionamento, de modo a avaliar o impacto do reforço do isolamento térmico do edifício, na temperatura

interior e na situação de conforto térmico dos ocupantes, com o sistema AVAC ligado, para determinar as necessidades energéticas do edifício e verificar o efeito do reforço de isolamento nas necessidades energéticas, e custos com climatização, do edifício.

4.1.1. Desempenho térmico da zona do jardim de infância

O edifício do jardim de infância, possui uma cobertura plana com 4cm de isolamento térmico, e duas palas de sombreamento nas salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$, orientadas a sul. As paredes exteriores têm 4cm de isolamento térmico, e a maior área da superfície exterior é envidraçada. A análise de desempenho do conforto térmico, sem sistema de climatização ativo, é realizada pelo modelo de conforto térmico adaptativo da ASHRAE 55 (ASHRAE 55, 2017). Para a semana e dia, mais frio e mais quente, sem sistema de climatização, foi feita a verificação se a temperatura operativa se encontra ou não no intervalo de conforto (sendo a temperatura mínima no inverno de 20°C e a temperatura máxima no verão de 26°C), pela norma EN 15251, tendo em conta que se trata de um edifício em fase de reabilitação (Categoria II) (EN 15251, 2006).

Na semana mais fria (de 21 a 25 janeiro) a temperatura exterior varia de 0°C a 15,0°C. Através do gráfico da Figura 42, verifica-se que a sala de aula $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$, linha superior, têm valores de temperatura ambiente interior muito próximos, isto acontece porque as salas de aula $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ estão orientadas a sul, têm as mesmas cargas internas e possuem praticamente a mesma área de envidraçados. A sala de aula $J_{0,3}$ também possui as mesmas cargas internas que as salas anteriores, e a mesma área de envidraçados que a sala de aula $J_{0,2}$, contudo possui temperatura ambiente interior inferior, porque se encontra orientada a norte, logo tem menores ganhos solares. A temperatura interior acompanha o perfil da temperatura exterior sendo 29,6% superior nas salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ e 9,1% superior na sala de aula $J_{0,3}$, no período de ocupação. Nas salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ a temperatura interior é aproximadamente 22,5% superior à da sala de aula $J_{0,3}$.

Durante o período de ocupação a temperatura operativa varia de 10,3°C a 22,8°C. A sala de aula $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ apresentam uma temperatura operativa superior a 20°C (e inferior a 26°C), durante grande parte da tarde (das 12:00h às 17:00h no dia 22, 23 e 25 de janeiro e no período das 13:00h às 16:00h no dia 24 de janeiro). Durante as restantes horas, no período de utilização da zona do jardim de infância, na semana mais fria, as temperaturas operativas são inferiores a 20°C, logo não se encontram no intervalo de temperatura de conforto (ver Figura 43).

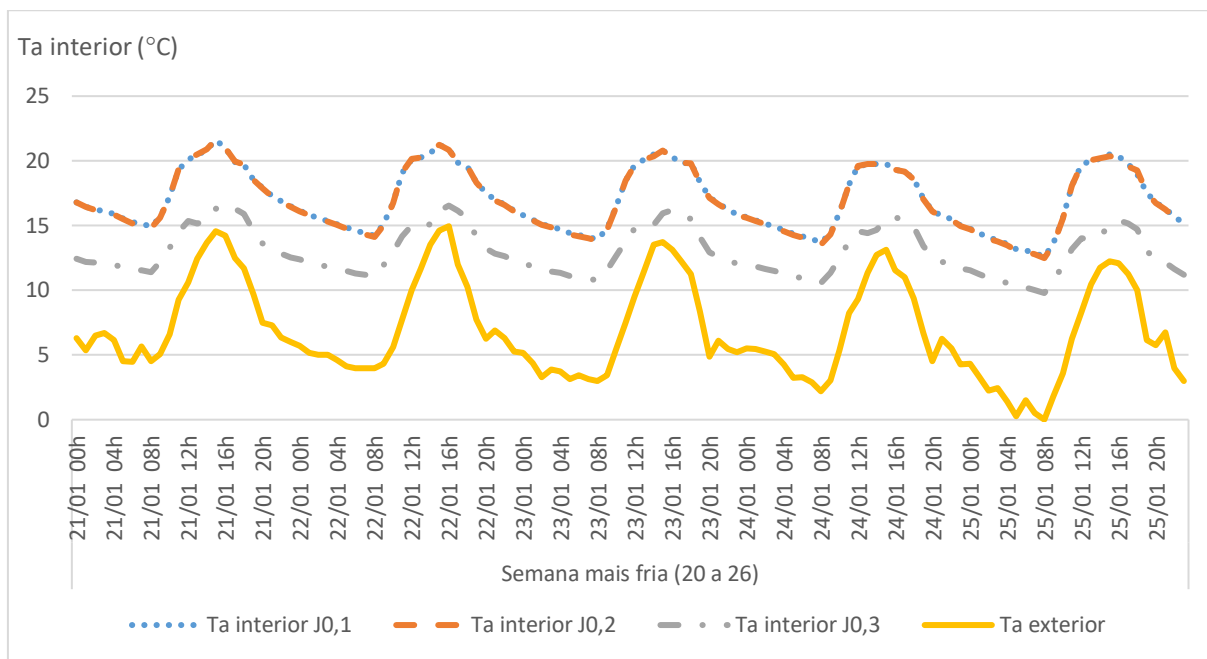


Figura 42 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais fria no jardim de infância – antes de reabilitação

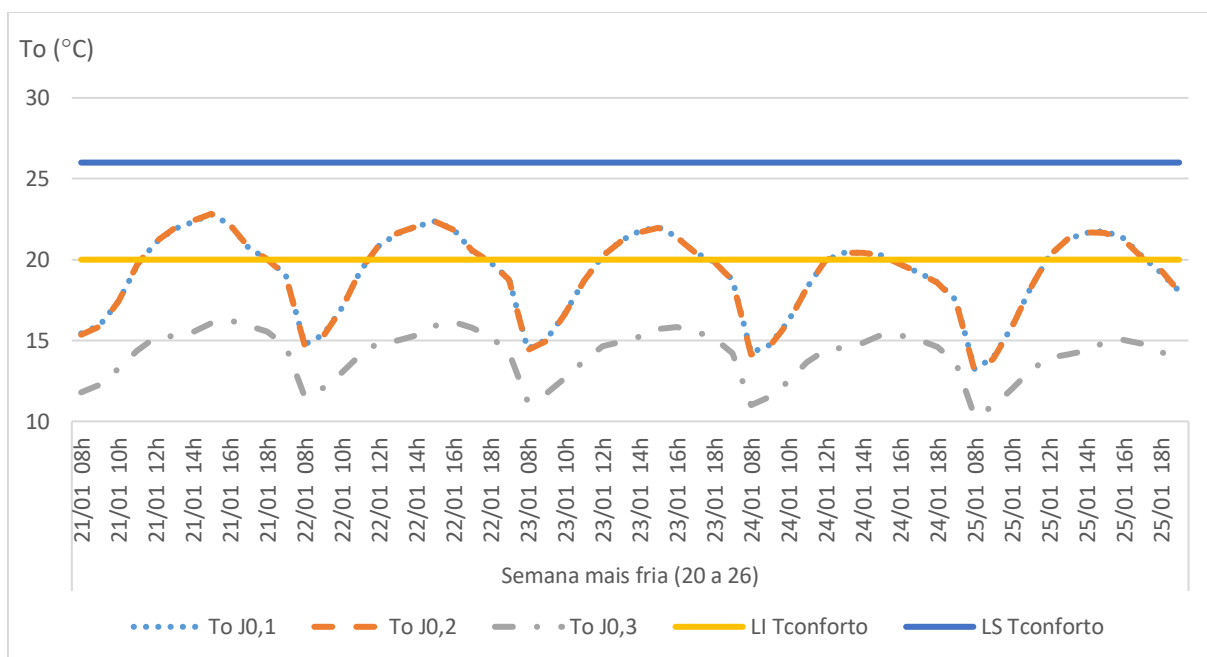


Figura 43 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais fria no jardim de infância – antes de reabilitação

Durante o inverno, no dia mais frio, dia 2 de janeiro, verifica-se que no período de ocupação do jardim de infância, os espaços com temperatura ambiente interior mais elevada são a sala de aula $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$, com $20,1^{\circ}\text{C}$, devido às suas cargas internas (ocupação, iluminação e equipamentos) e, em especial, aos

ganhos solares (encontram-se orientadas a sul). A sala de aula $J_{0,3}$ apresenta uma temperatura ambiente interior inferior (pois encontra-se orientada a norte), que varia de 8,5°C a 13,5°C, no período de ocupação (Figura 44).

Durante o período de ocupação, no dia 2 de janeiro, a temperatura operativa encontra-se no intervalo de temperatura de conforto das 14:00h às 16:00h nas salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$. Nas três salas de aulas a temperatura operativa não está no intervalo de conforto, durante 20 horas (Figura 45).

A análise do conforto térmico não pode ser realizada para o dia mais frio, porque o valor da temperatura exterior média mensal é inferior a 9,4°C.

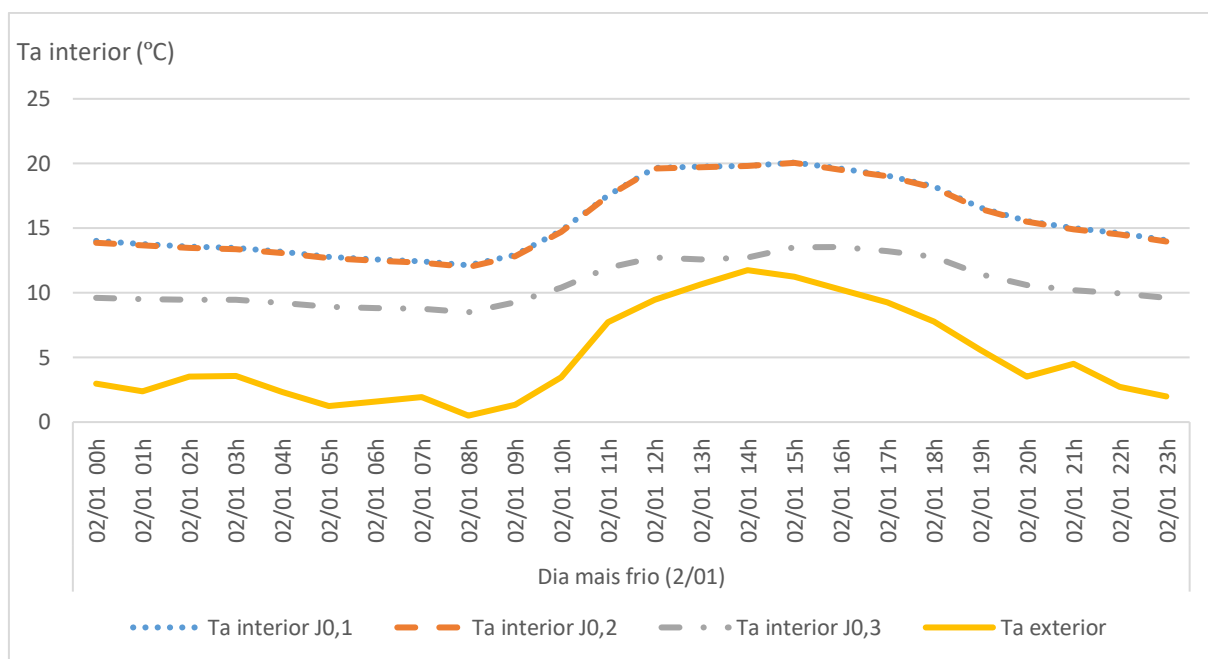


Figura 44 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais frio no jardim de infância – antes de reabilitação

Na semana mais quente (de 16 a 22 de junho), a temperatura exterior varia de 11,9°C (durante a noite) a 28,4°C (durante a tarde), e a temperatura interior varia de 21,5°C a 30,8°C, no período de ocupação do jardim de infância, devido às cargas internas e aos ganhos solares. As salas de aulas $J_{0,1}$, $J_{0,2}$ e $J_{0,3}$ têm valores relativamente próximos de temperatura interior, que variam de 21,5°C a 30,5°C, de 21,8°C a 30,8°C e de 21,8°C a 29,8°C respetivamente. A temperatura operativa varia de 22,3°C a 30,5°C, de 22,7°C a 31,0°C e de 22,7°C a 29,7°C respetivamente (Figuras 46 e 47), pois apenas da sala de aula $J_{0,3}$ estar orientada a norte, as salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ possuem palas de sombreamento (orientadas a sul).

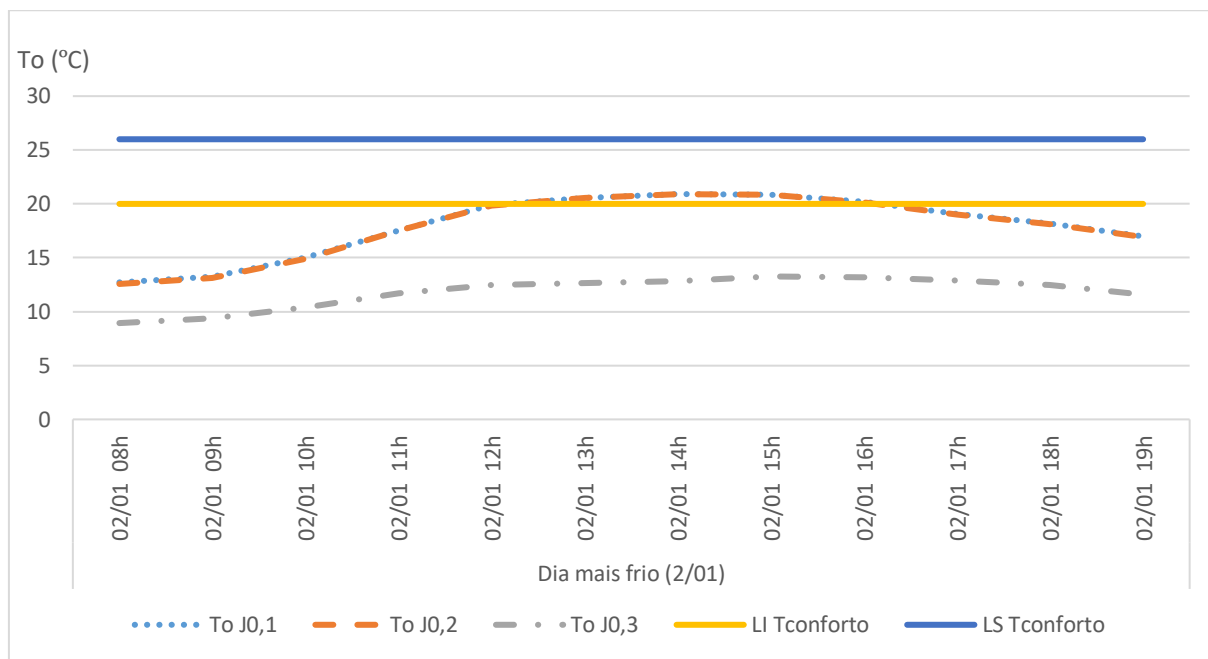


Figura 45 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais frio no jardim de infância – antes de reabilitação

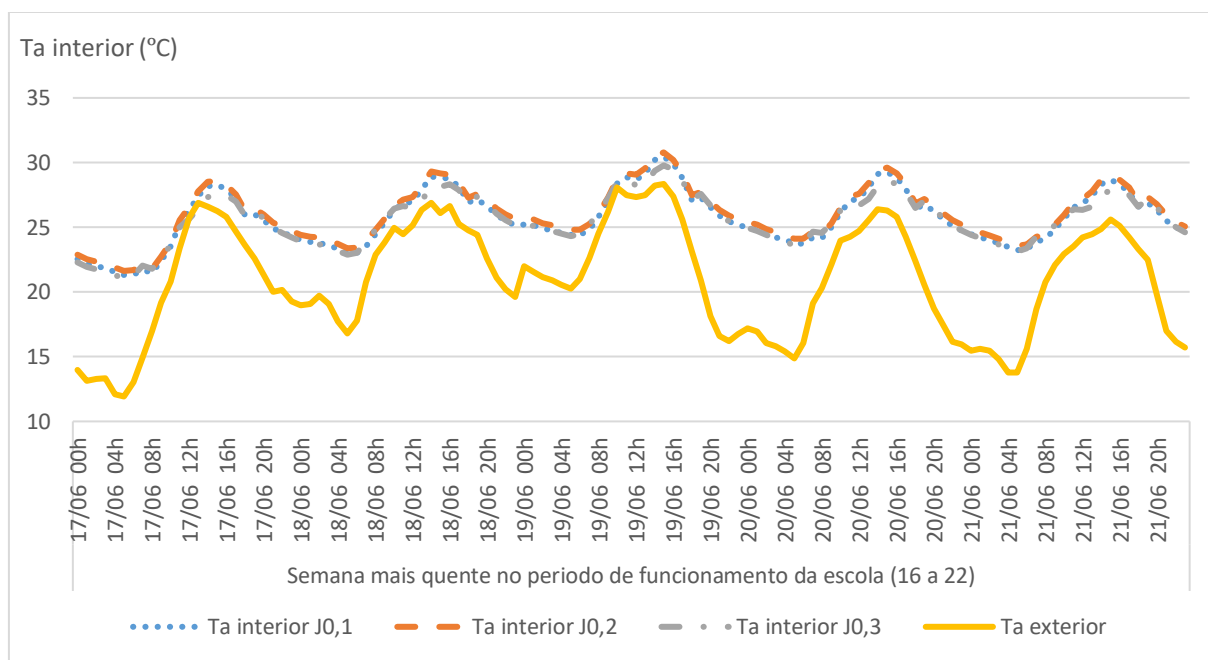


Figura 46 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – antes de reabilitação

No jardim de infância, na semana mais quente a temperatura operativa encontra-se no intervalo de temperatura de conforto no período da manhã, quando a temperatura exterior e os ganhos solares são menores (17 de junho das 08:00h às 11:00h, nos dias 18 e 20 de junho das 08:00h às 9:00h, no dia

19 de junho às 08:00h e no dia 21 de junho das 08:00h às 10:00h), nos restantes períodos durante a semana, a temperatura operativa é superior a 26°C (ver Figura 47).

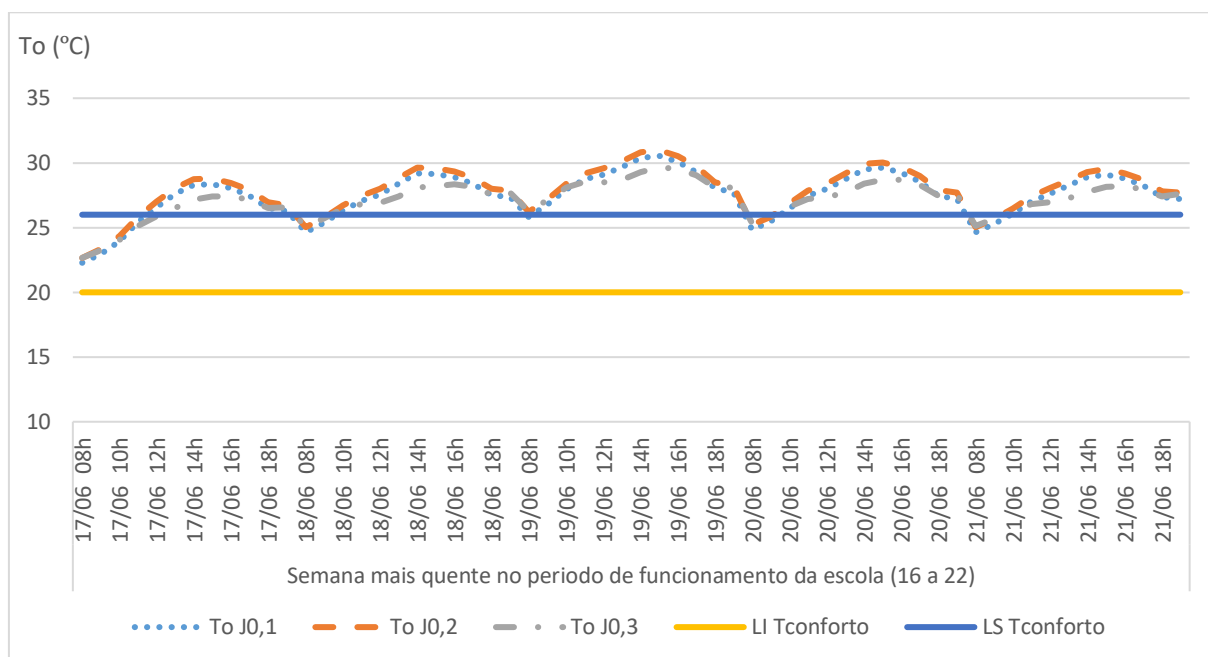


Figura 47 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – antes de reabilitação

No dia mais quente do período de ocupação do jardim de infância (6 de julho), a temperatura ambiente exterior varia de 25,0°C a 31,5°C, e a temperatura interior varia de 24,2°C a 30,1°C. As salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ atingem maior valor de temperatura interior, aproximadamente 30,0°C às 15:00h, e a sala de aula $J_{0,3}$ atinge o maior valor de temperatura interior, de 28,8°C, às 19:00h, porque as salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ (orientadas a sul) têm mais ganhos solares que a sala de aula $J_{0,3}$ (orientadas a norte). A temperatura interior das três salas de aula, das 08:00h às 12:00h e das 17:00h às 19:00h, é menor que a temperatura exterior, devido à existência de isolamento térmico de 4cm nas paredes exteriores e na cobertura plana, e de palas de sombreamento nas salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$, diminuindo, assim, os ganhos de energia através da envolvente e os ganhos solares. (ver Figura 48).

Durante o dia 6 de julho, através da Figura 49, verifica-se que a temperatura operativa nas salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,3}$ das 08:00h às 10:00h e na sala de aula $J_{0,2}$ das 08:00h às 09:00h, encontram-se dentro do intervalo de conforto, nos restantes 28 horas, a temperatura operativa é superior a 26°C, ultrapassando o limite superior do intervalo de conforto.

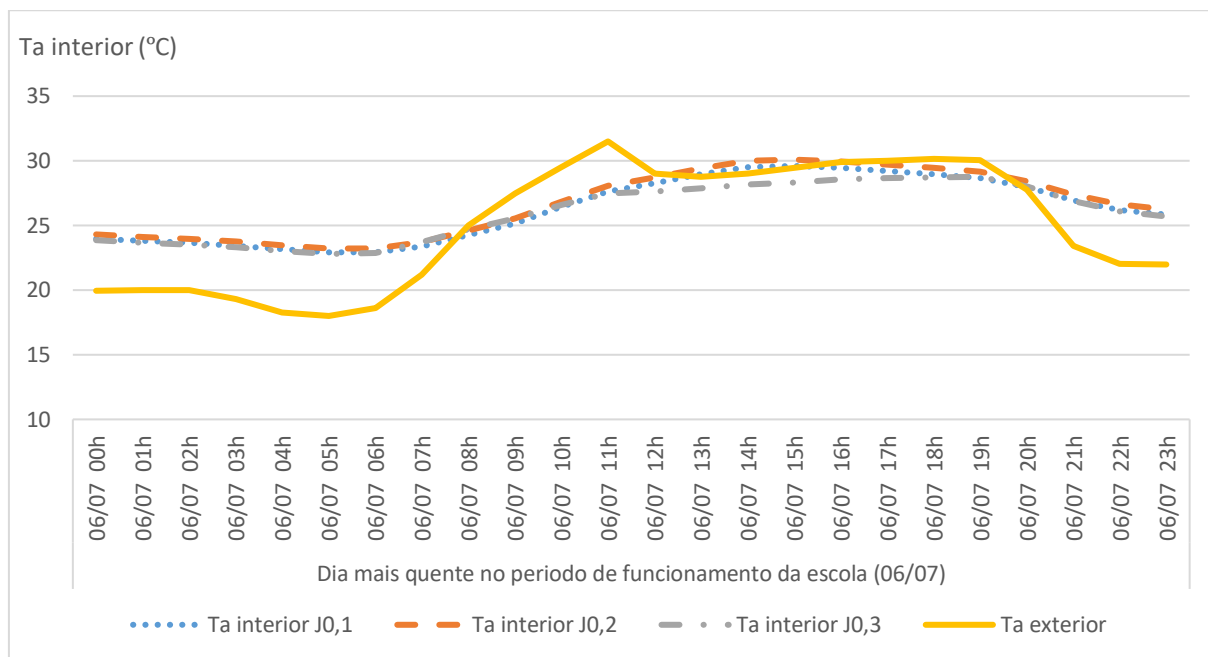


Figura 48 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – antes de reabilitação

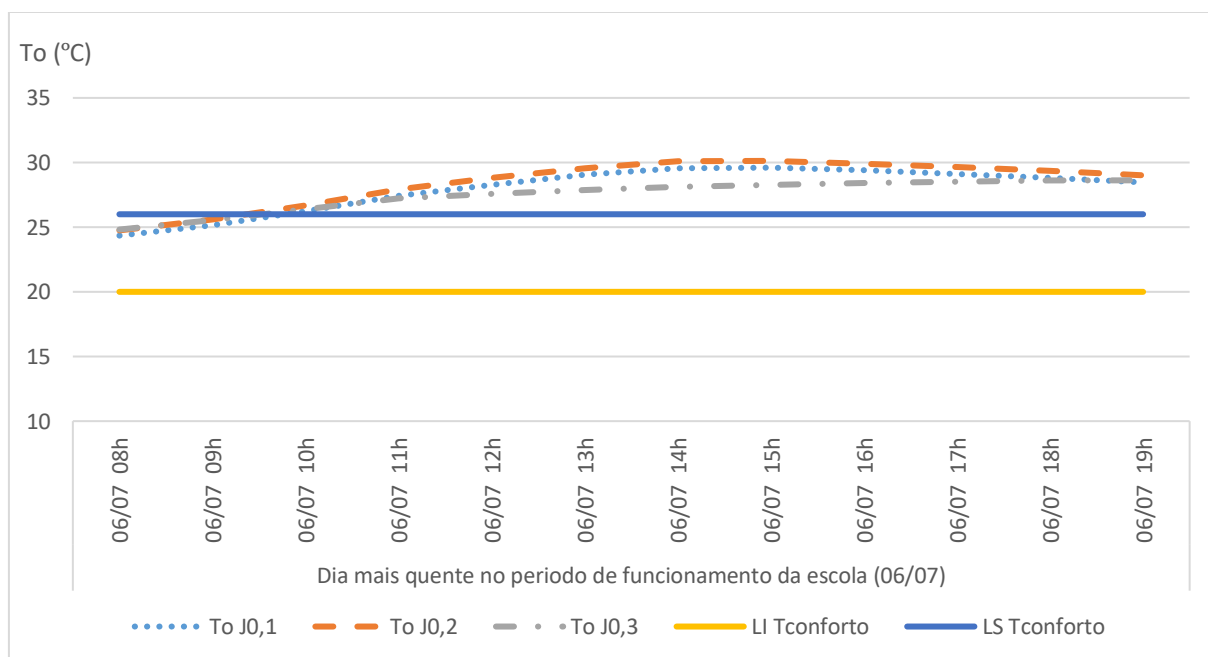


Figura 49 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – antes de reabilitação

Através da análise do conforto térmico, pelo modelo de conforto térmico adaptativo da norma ASHRAE 55 (ASHRAE 55, 2017), para o dia mais quente do período de ocupação, verifica-se que os ocupantes de todas as salas de aulas se encontram em conforto (Figura 50). A temperatura operativa encontra-se

no limite superior de conforto térmico (80% de aceitabilidade) para uma temperatura exterior média mensal de 18,99°C e uma temperatura operativa de 26,8°C.

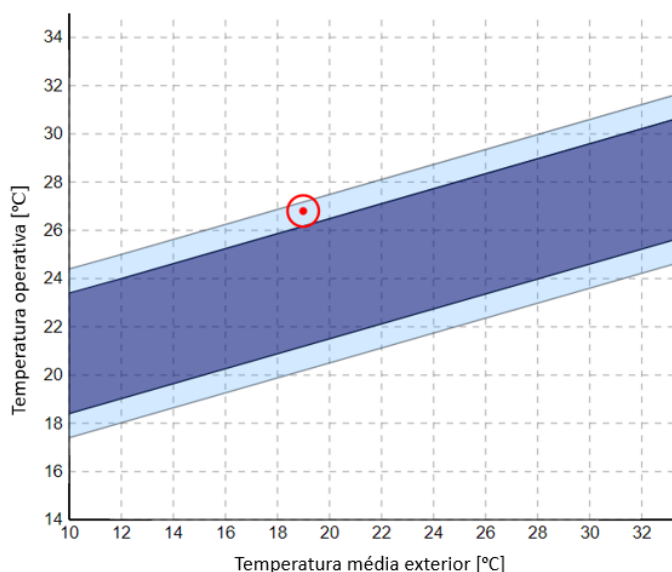


Figura 50 - Modelo de conforto térmico adaptativo, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do jardim de infância, nas salas de aulas, considerando a situação mais desfavorável (CBE Thermal Comfort Tool, 2019)

4.1.2. Desempenho térmico da zona do ensino básico – 1º ciclo

O edifício do ensino básico – 1º ciclo, possui uma cobertura com painel sandwich com isolamento de 6cm e não tem nenhum sistema exterior de sombreamento. As paredes exteriores são duplas, sem isolamento térmico. A análise de desempenho do conforto térmico, sem sistema de climatização ativo, é realizada pelo modelo de conforto térmico adaptativo da ASHRAE 55 (ASHRAE 55, 2017). Para a semana e dia, mais frio e mais quente, sem sistema de climatização, foi feita a verificação se a temperatura operativa se encontra ou não no intervalo de conforto (sendo a temperatura mínima no inverno de 20°C e a temperatura máxima no verão de 26°C), pela norma EN 15251, tendo em conta que se trata de um edifício em fase de reabilitação (Categoria II) (EN 15251, 2006).

Na semana mais fria, de 21 a 25 de janeiro, a temperatura ambiente exterior varia de 0°C a 15,0°C, e a temperatura ambiente interior varia de 10,8°C a 19,9°C, no período de ocupação. As salas de aula P_{1,8}, P_{1,9}, e P_{1,10} (piso 1), apresentam maiores valores de temperatura interior entre as 08:00h e as 12:00h e entre as 14:00h e as 18:00h, horário no qual decorrem as aulas do ensino básico – 1º ciclo, com um

máximo de 18,5°C na sala de aula P_{1,8} e na sala de aula P_{1,9}, e um mínimo de 11,4°C, na sala de aula P_{1,10}.

As três salas de aula têm a mesma carga térmica e a mesma área de envidraçados, no entanto a sala de aula P_{1,10} tem mais perdas através do envidraçado exterior, cobertura e parede, em relação às outras duas salas de aula.

As salas de aula do piso 0 (salas de aula P_{0,1}, P_{0,2} e P_{0,3}), apresentam valores próximos de temperatura interior, que variam de 12,7°C a 19,9°C, estes valores diferem devido aos ganhos solares, pois a sala de aula P_{0,3} tem menor área de envidraçados que as outras duas salas, enquanto que as salas de aulas P_{0,1} e P_{0,2} tem a mesma área de envidraçados, mas a sala de aula P_{0,2} tem menor área de parede exterior. Comparando as salas do piso 0 com as do piso 1, verifica-se que as salas do piso 1 têm temperaturas inferiores, uma vez que existem menores ganhos solares através dos envidraçados, de 28,4%, e consequentemente menores perdas através da envolvente, de 53,8%, ao ano (ver Figura 51).

A sala de expressão plástica P_{1,17} tem maiores valores de temperatura no seu horário de funcionamento (08:00h às 12:00h e das 14:00h às 18:00h), devido aos ganhos internos.

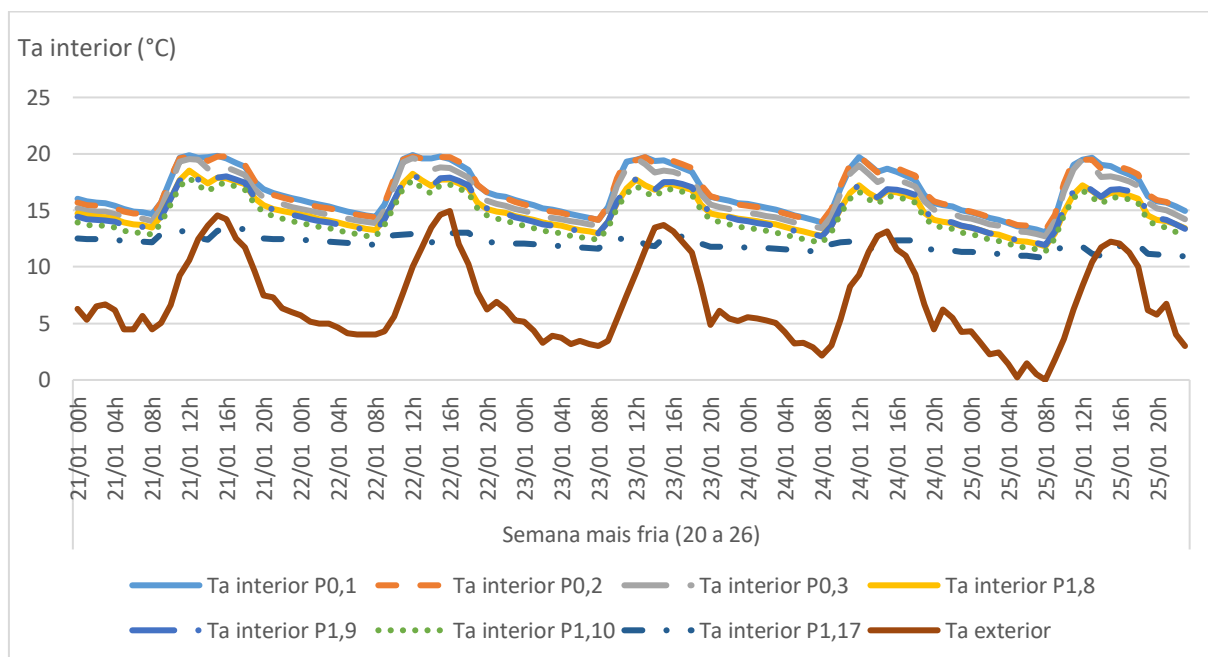


Figura 51 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação

Durante o período de ocupação a temperatura operativa varia de 11,0°C (às 08:00h) a 20,4°C (às 12:00h). Através da análise da Figura 52, verifica-se que nas salas de aulas (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica P_{1,17}, durante toda a semana, a temperatura operativa é inferior a 20°C (não se encontra no intervalo de conforto).

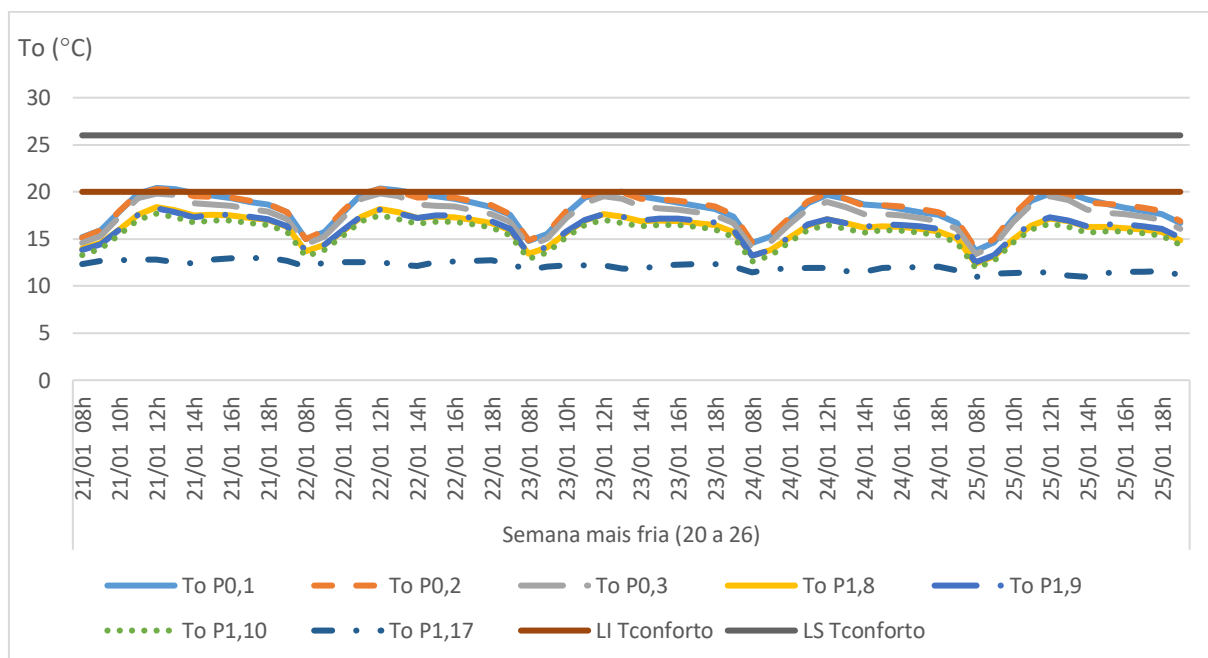


Figura 52 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação

No dia mais frio, dia 2 de janeiro (Figuras 53), verifica-se que durante o período no qual decorrem as aulas, os espaços com maior temperatura interior são as salas de aula do piso 0 comparativamente com as salas de aula do piso 1, pois estão orientadas a sudeste, têm as mesmas cargas internas (ocupação, iluminação e equipamentos), contudo o piso 1 tem menores ganhos solares. A sala de expressão plástica P_{1,17} apresenta uma temperatura interior inferior em relação às salas de aulas, pois não tem ganhos solares.

Durante o período de ocupação, no dia 2 de janeiro, a temperatura operativa é inferior a 20°C, logo a temperatura operativa não está no intervalo de conforto (ver Figura 54).

A análise de conforto térmico, para o dia mais frio, não pode ser realizada, porque a $\overline{t_{pma(out)}} < 9,4^{\circ}\text{C}$, por mês.

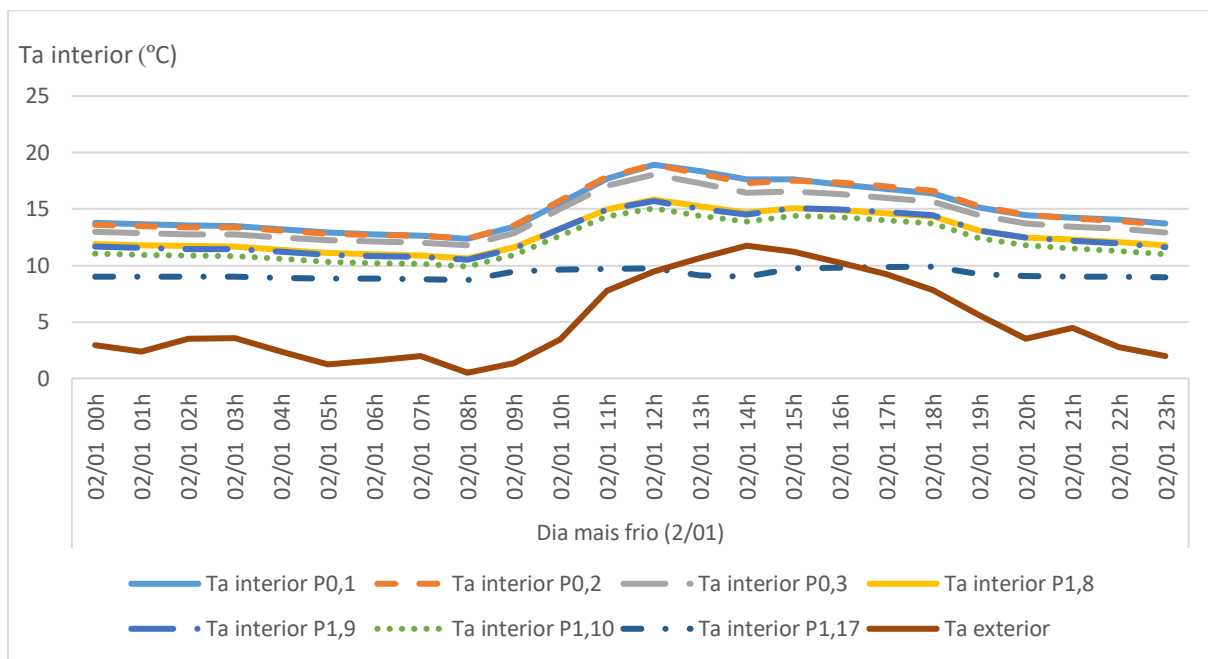


Figura 53 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação

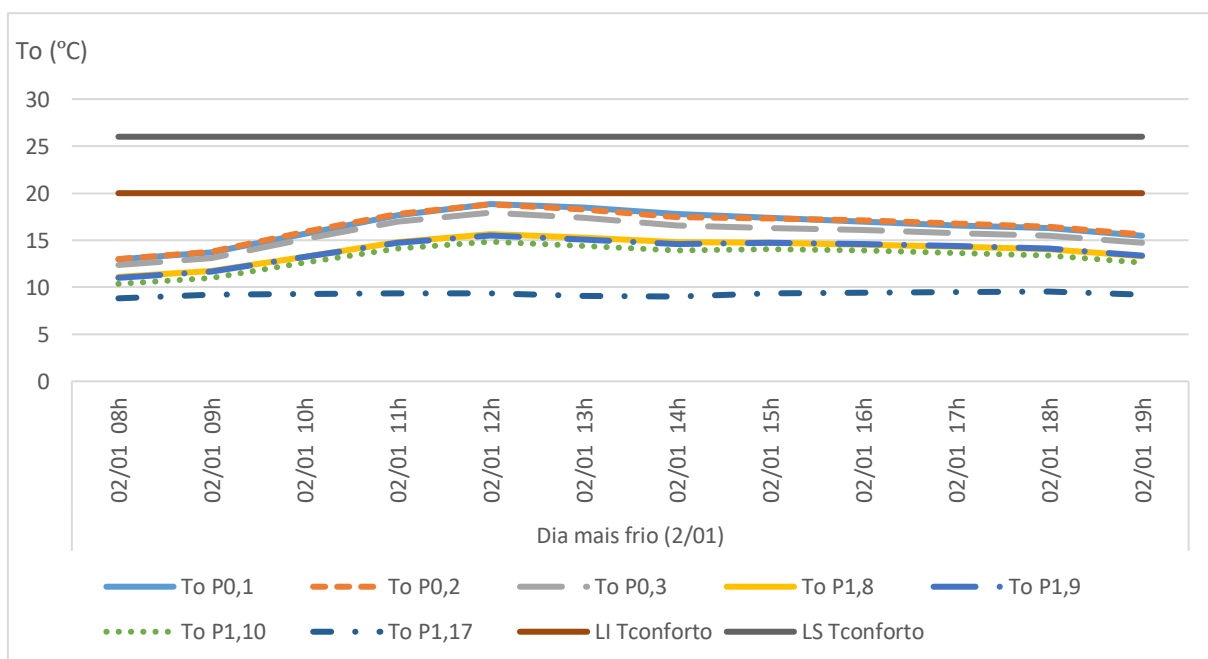


Figura 54 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação

Na semana mais quente no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo (de 17 a 23 de junho), a temperatura ambiente exterior varia de 11,9°C (às 05:00h) a 28,3°C (às 15:00h), e a

temperatura ambiente interior varia de 20,9°C (às 08:00h) a 31,9°C (às 11:00h). A temperatura interior da sala de expressão plástica P_{1,17} varia de 20,9°C a 26,4°C.

As salas de aula P_{1,8}, P_{1,9} e P_{1,10}, do piso 1, apresentam maiores valores de temperatura interior entre as 08:00h e as 12:00h e entre as 14:00h e as 18:00h, horário no qual decorrem as aulas do ensino básico – 1º ciclo, cujo maior valor, de 30,0°C, corresponde à sala de aula P_{1,9}, e o menor valor, de 22,7°C, corresponde à sala de aula P_{1,10}. As três salas têm as mesmas cargas internas e a mesma área de envidraçados, tendo por isso ganhos solares semelhantes, devendo-se as diferenças às perdas através da envolvente opaca.

As salas do piso 0 (salas de aula P_{0,1}, P_{0,2} e P_{0,3}), apresentam valores de temperatura interior que variam de 21,8°C (às 05:00h) a 31,9°C (às 11:00h) e as salas do piso 1 (sala de aula P_{1,8}, P_{1,9} e P_{1,10}) apresentam valores de temperatura interior que variam de 22,7°C (às 05:00h) a 30,0°C (às 15:00h), verifica-se que as salas do piso 0 e do piso 1 têm temperaturas interiores relativamente próximas, sendo a temperatura interior das salas de aulas do piso 0 6% superior à das salas do piso 1 (ver Figura 55).

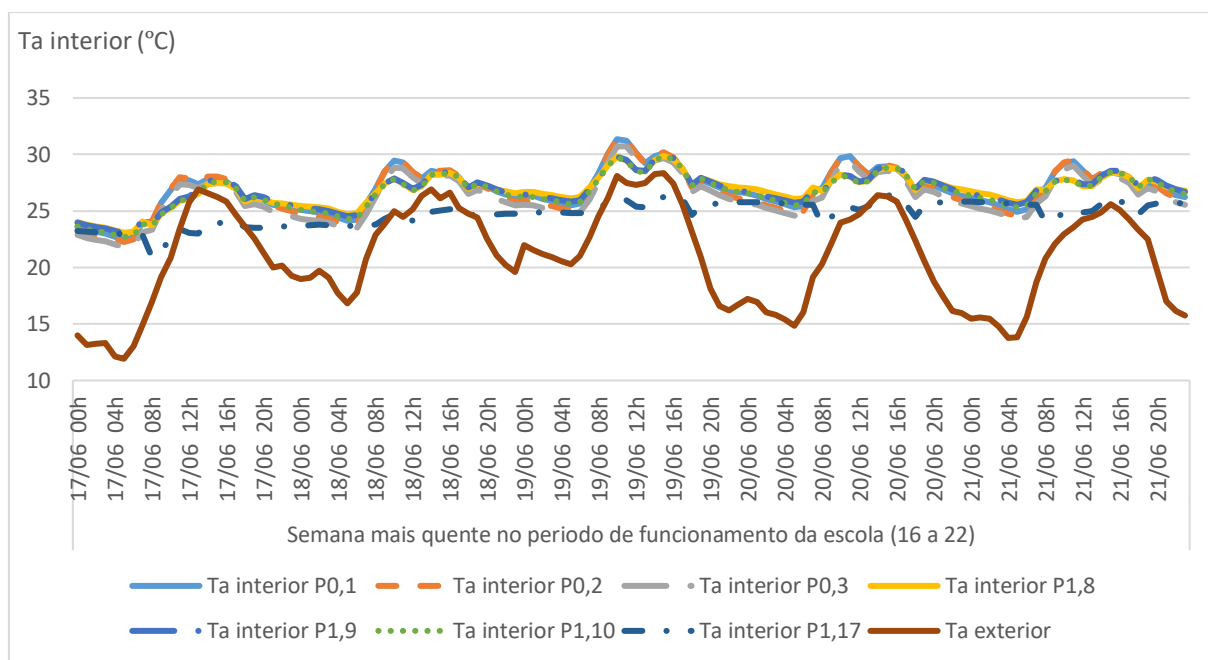


Figura 55 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação

Nas salas de aula do piso 0 e do piso 1, durante a semana mais quente, a temperatura operativa é superior a 26°C, exceto no dia 17 de junho, nas salas de aulas do piso 1 das 08:00h às 09:00h. A

temperatura operativa da sala de expressão plástica $P_{1,17}$ encontra-se no intervalo em conforto, pois a temperatura operativa está compreendida entre 20°C e 26°C (ver Figura 56).

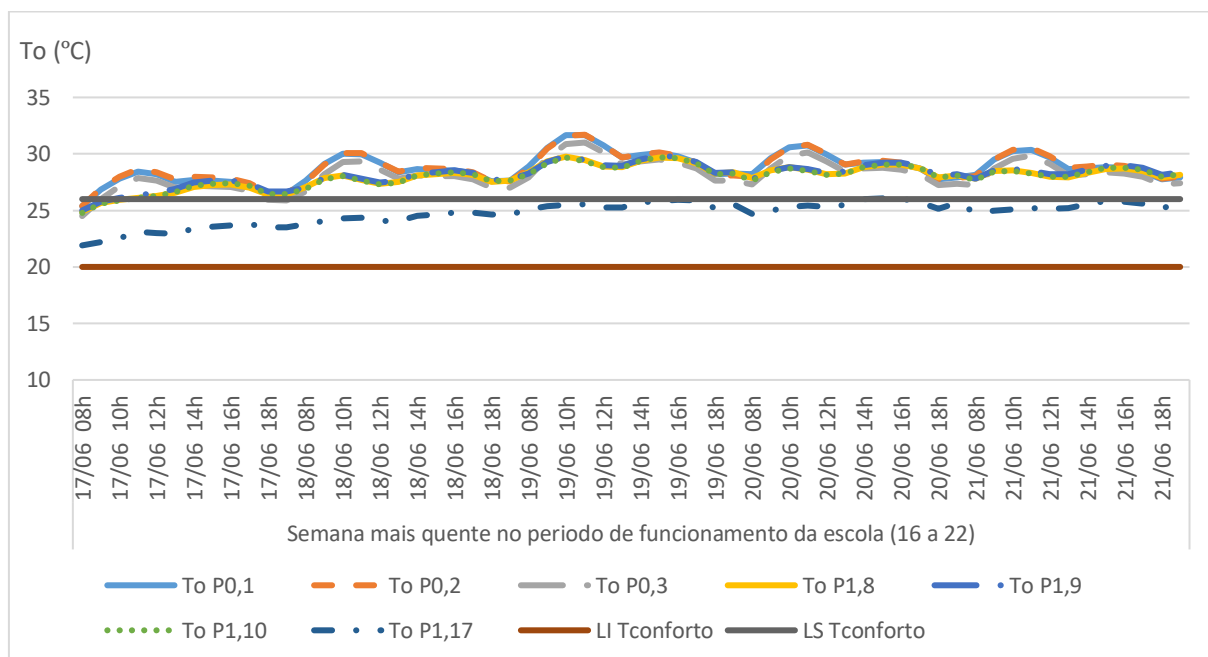


Figura 56 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação

No dia mais quente do período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo (19 de junho), a temperatura exterior varia de 20,9°C (às 19:00h) a 28,3°C (às 13:00h), e a temperatura interior varia de 24,7°C (às 18:00h) a 31,4°C (às 10:00h). As salas de aulas do piso 0 apresentam maiores valores de temperatura interior das 09:00h às 12:00h, que variam de 29,3°C a 31,4°C, enquanto que as salas de aula do piso 1 apresentam menores valores de temperatura interior (variavam de 28,5°C a 29,8°C), porque as salas de aulas do piso 1 têm menores ganhos solares. A temperatura interior da sala de expressão plástica $P_{1,17}$ varia de 24,7°C a 26,3°C, pois não tem ganhos solares (ver Figura 57).

Durante o dia mais quente, nas salas de aulas (piso 0 e piso 1) a temperatura operativa é superior a 26°C, exceto na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, onde a temperatura operativa varia entre os 25,0 e os 25,9°C, ou seja, encontra-se no intervalo de conforto (ver Figura 58).

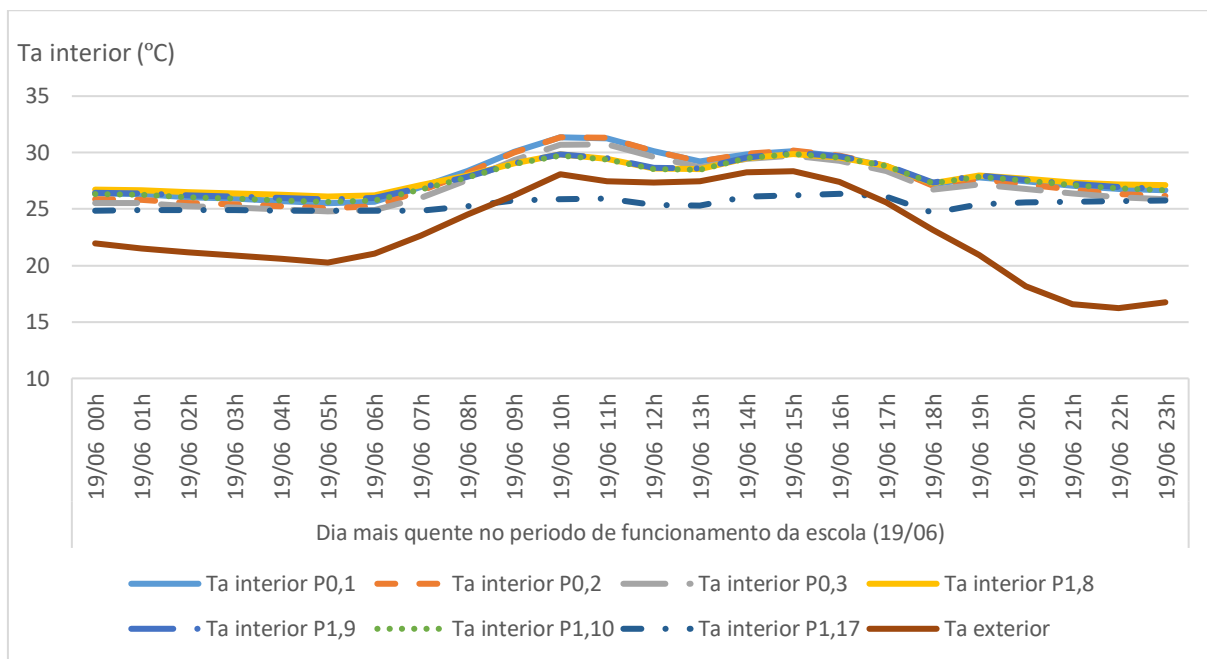


Figura 57 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação

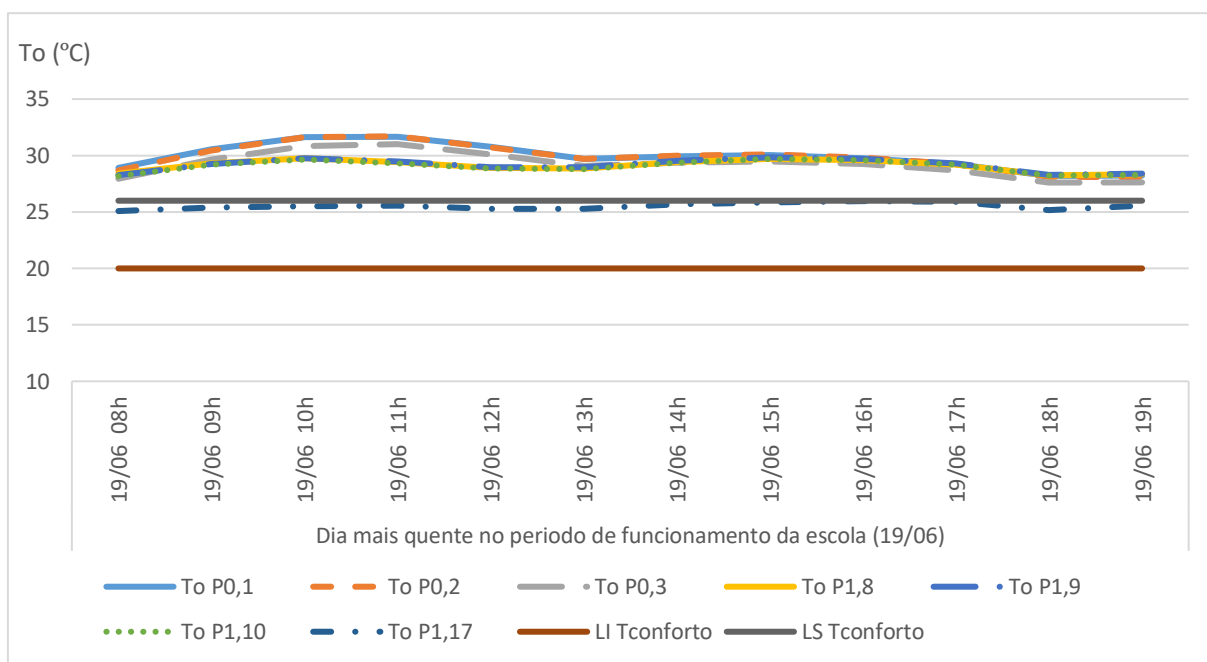


Figura 58 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação

Através da análise do conforto térmico, pelo modelo de conforto térmico adaptativo (ASHRAE 55, 2017), para o dia 19 de junho, tendo em consideração que a temperatura exterior média mensal é igual a 17,82°C e as temperaturas operativas das salas de aula do piso 0 e do piso 1 variam de 27,6°C a

28,3°C, verifica-se que os ocupantes das salas de aula se encontram em desconforto, exceto na sala de expressão plástica $P_{1,17}$ (onde o valor de temperatura operativa de 25,4°C), em que a temperatura operativa encontra-se no limite inferior de conforto térmico (90% de aceitabilidade), isto verifica-se porque a sala de expressão plástica $P_{1,17}$ está orientada a norte e as salas de aulas do piso 0 e do piso 1 estão orientadas a sudeste, logo a sala de expressão plástica $P_{1,17}$ tem menores ganhos através dos envidraçados, da cobertura e das paredes (ver Figura 59). As salas de aulas (piso 0 e piso 1) têm uma temperatura operativa superior ao limite superior de conforto térmico (80% de aceitabilidade), para os seus ocupantes atingirem o conforto, será necessário reduzir os ganhos de energia através da envolvente e os ganhos solares através dos envidraçados, para tal é necessário colocar isolamento na envolvente e palas de sombreamento nas salas de aulas.

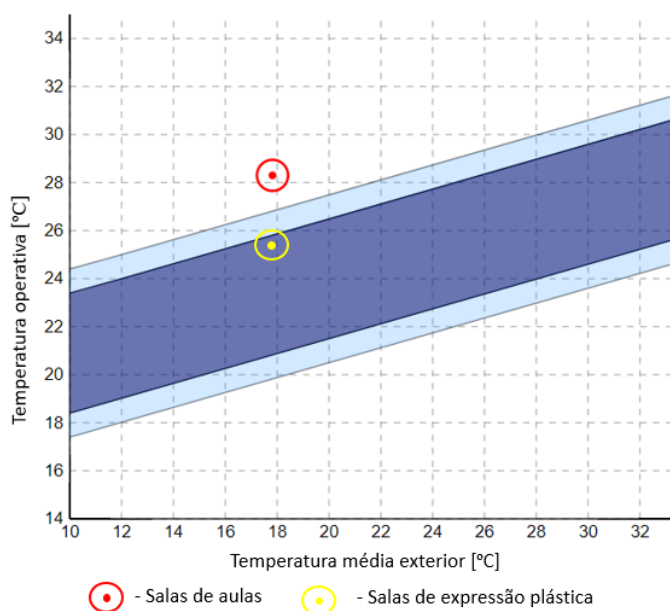


Figura 59 - Modelo de conforto térmico adaptativo, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, considerando a situação mais desfavorável (CBE Thermal Confort Tool, 2019)

4.2. Desempenho termo-energético do edifício antes de reabilitação - com sistema AVAC ativo

A análise de desempenho do conforto térmico, com sistema de climatização ativo, é realizada pelo modelo da zona de conforto da ASHRAE 55 (ASHRAE 55, 2017). Para a semana e dia, mais frio e mais quente, com sistema de climatização, foi feita a verificação se a temperatura operativa se encontra ou

não no intervalo de conforto (sendo a temperatura mínima no inverno de 20°C e a temperatura máxima no verão de 26°C), pela norma EN 15251, tendo em conta que se trata de um edifício em fase de reabilitação (Categoria II) (EN 15251, 2006).

4.2.1. Desempenho termo-energético da zona do Jardim de Infância

4.2.1.1. Desempenho térmico da zona do jardim de infância

Na semana mais fria, durante o período de ocupação do jardim de infância, a temperatura interior varia de 12,0°C a 22,1°C, o menor valor corresponde à sala de aula J_{0,3} e o maior valor corresponde à sala de aula J_{0,2}, devido aos ganhos solares, pois as salas de aulas J_{0,1} e J_{0,2} estão orientadas a sul e a sala de aula J_{0,3} está orientada a norte. Durante a semana, a temperatura interior vai aumentando a partir das 08:00h, até atingir uma temperatura de 20°C pelas 10:00h, e entre as 10:00h e as 19:00h a temperatura interior mantém-se constante nos 20°C na sala de aula J_{0,3} e entre os 20°C e os 22,1°C nas salas de aulas J_{0,1} e J_{0,2}, devido à existência de sistema AVAC, cuja a temperatura interior mínima, no inverno, é de 20°C e o período de funcionamento deste é entre as 08:00h e as 19:00h, nas salas de aulas do jardim de infância (ver Figura 60).

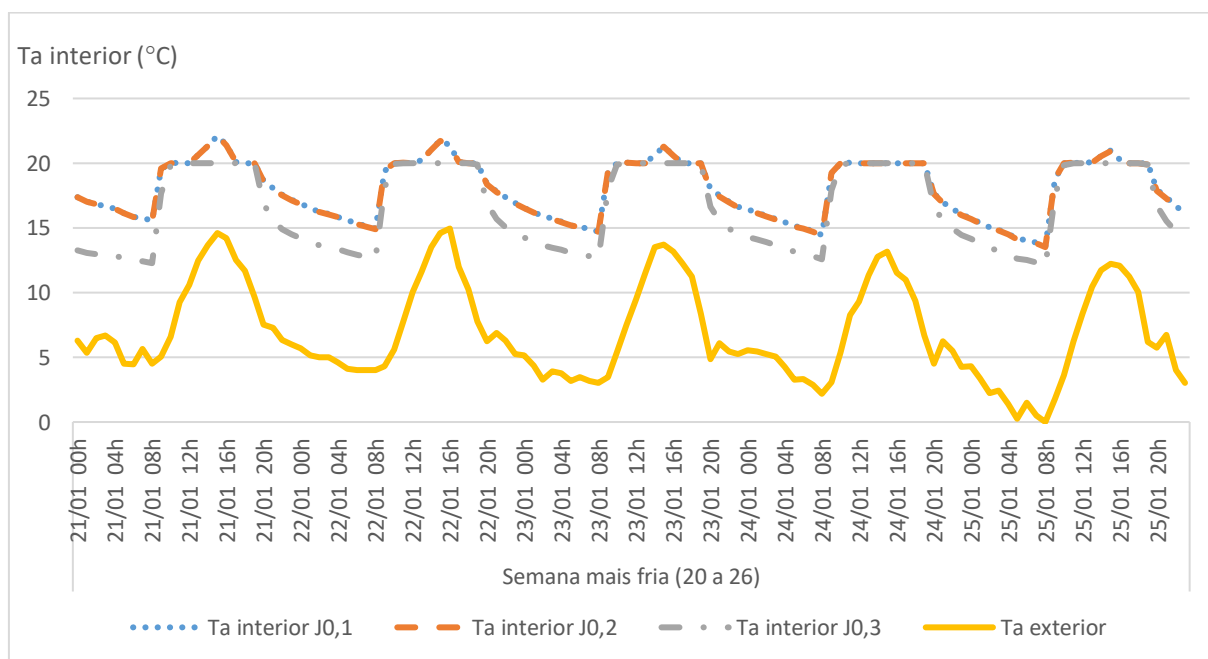


Figura 60 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais fria no jardim de infância – antes de reabilitação

Na semana de 21 a 25 de janeiro, durante o período de ocupação, a temperatura operativa varia de 12,6°C a 23,2°C. A temperatura operativa nas salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$, encontra-se no intervalo de conforto das 11:00h às 12:00h e das 14:00h às 19:00h no dia 21 de janeiro, das 11:00h às 12:00h e das 14:00h às 18:00h nos dias 22, 23 e 25 de janeiro e das 11:00h às 12:00h e das 14:00h às 16:00h no dia 24 de janeiro. Na sala de aula $J_{0,3}$, a temperatura operativa não se encontra no intervalo de conforto durante toda a semana (ver Figura 61).

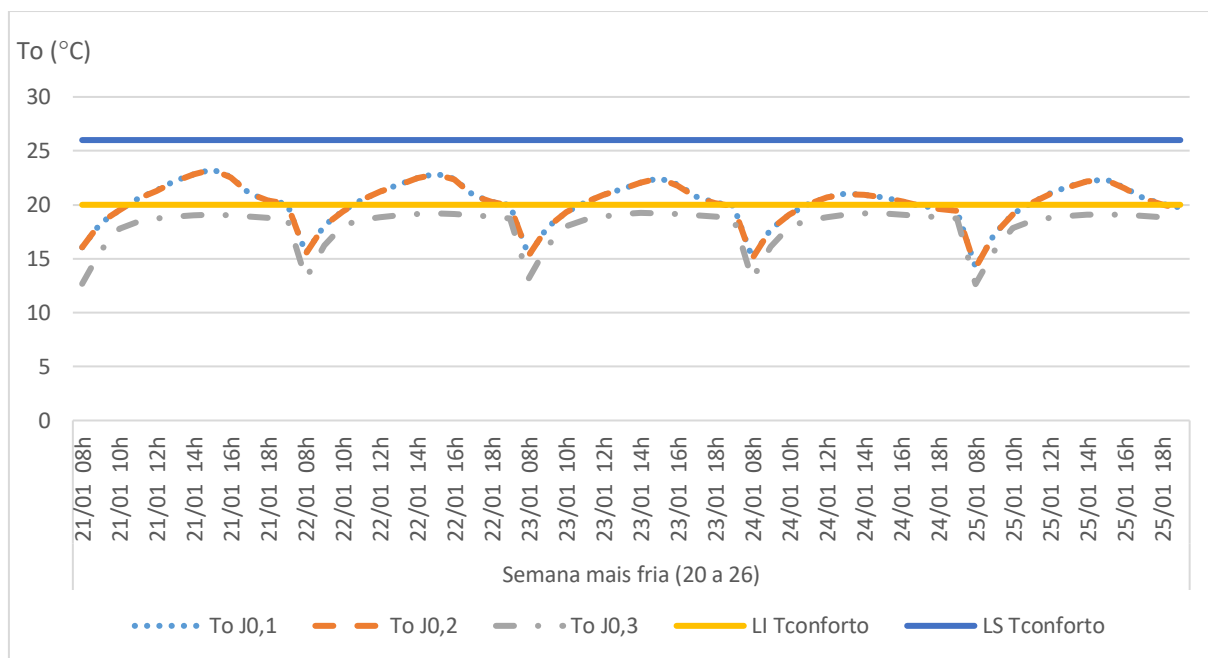


Figura 61 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais fria no jardim de infância – antes de reabilitação

Durante o inverno, no dia mais frio, verifica-se que no período de ocupação do jardim de infância, a temperatura interior varia de 11,6°C a 20,1°C. As salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ (orientadas a sul), têm temperatura interior superior à sala de aula $J_{0,3}$ (orientada a norte), devido aos maiores ganhos solares. O sistema AVAC, liga às 08:00h em que a temperatura interior vai aumentando gradualmente até que atinge uma temperatura de 20°C pelas 11:00h, na sala de aula $J_{0,3}$ e nas salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ atinge mais cedo, pelas 10:00h, mantendo as três salas de aulas uma temperatura constante, aproximadamente de 20°C, até às 19:00h, hora em que o sistema é desligado (20°C é a temperatura interior mínima considerada no sistema AVAC, no inverno) (ver Figura 62).

Durante o período de ocupação, no dia 2 de janeiro, a temperatura operativa nas salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$, das 11:00h às 17:00h encontra-se no intervalo de conforto. Nas restantes 15 horas, de ocupação das

salas de aulas $J_{0,1}$, $J_{0,2}$ e $J_{0,3}$, a temperatura operativa é inferior a 20°C (não está no intervalo de conforto) (ver Figura 63).

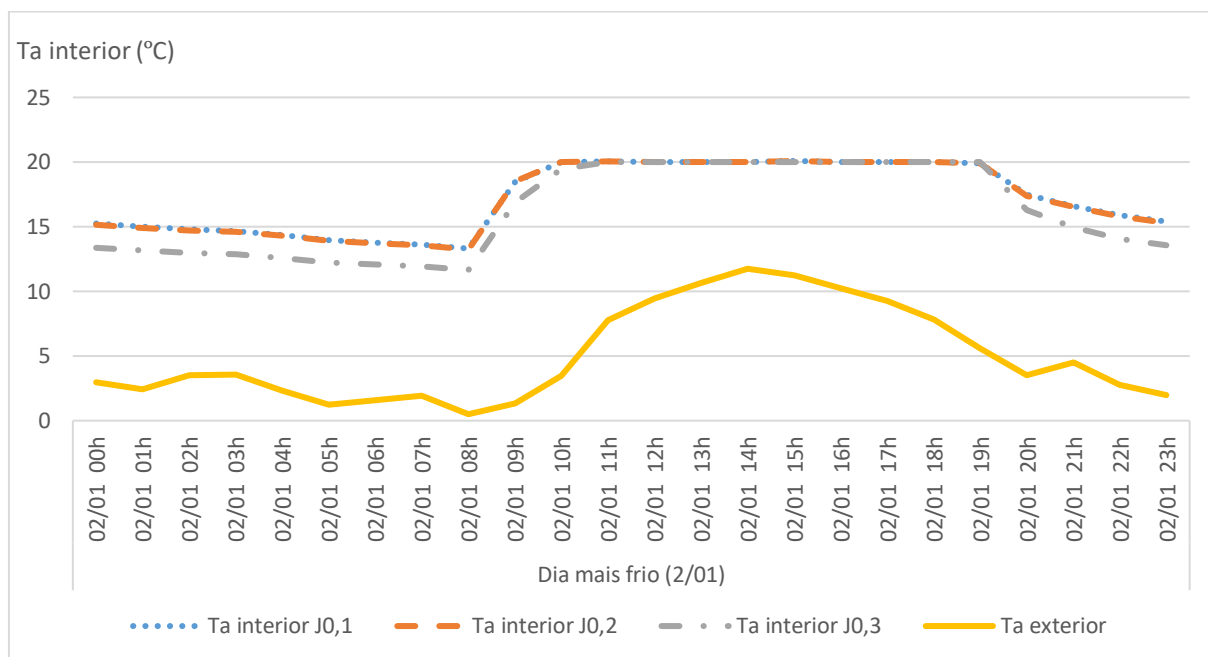


Figura 62 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais frio no jardim de infância – antes de reabilitação

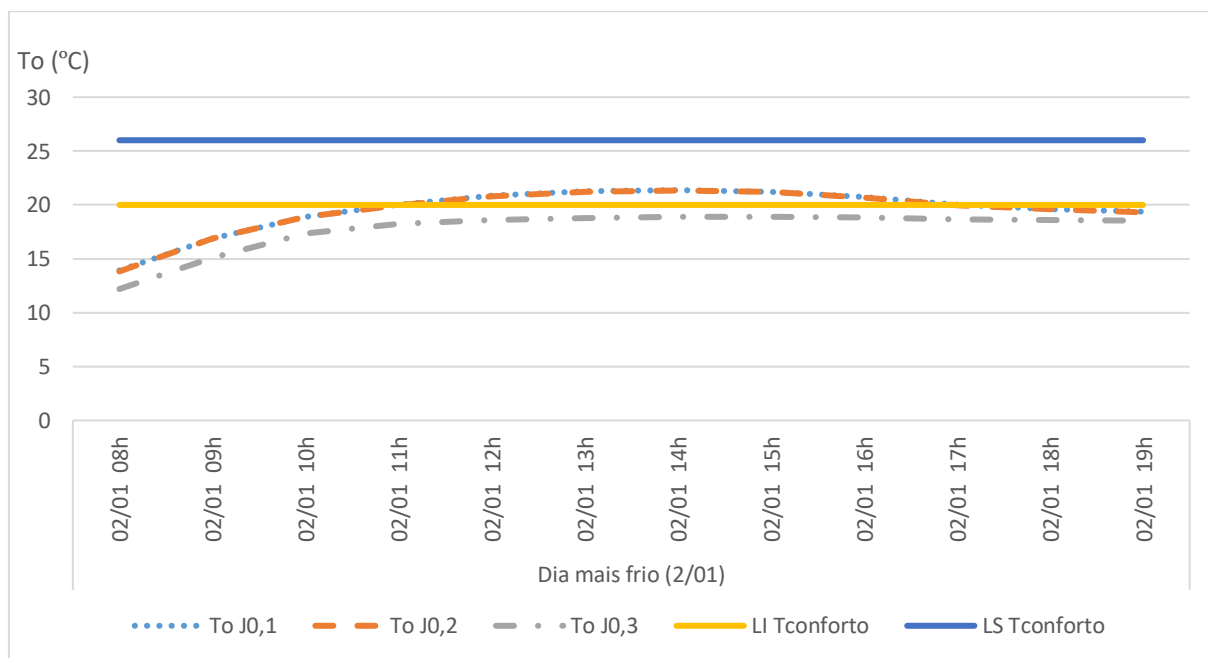


Figura 63 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais frio no jardim de infância – antes de reabilitação

Através da análise do conforto térmico, pelo método da zona de conforto (ASHRAE 55, 2017), para o dia 2 de janeiro no jardim de infância, as temperaturas operativas das salas de aulas ($J_{0,1}$, $J_{0,2}$ e $J_{0,3}$), variam de 15,77°C a 17,56°C, tendo em conta que a taxa metabólica dos ocupantes é de 1,2 met, o isolamento do vestuário no inverno de 1,0 clo, a velocidade média do ar inferior a 0,1 m/s e a humidade relativa de 55,80%, verifica-se que os ocupantes das salas de aulas, não estão em conforto (ver Figura 64). Uma possível solução, para a temperatura operativa das salas de aulas, atingir a zona de conforto, seria o aumento do isolamento térmico nas paredes exteriores e na cobertura, diminuindo, assim, as perdas de calor do interior para o exterior.

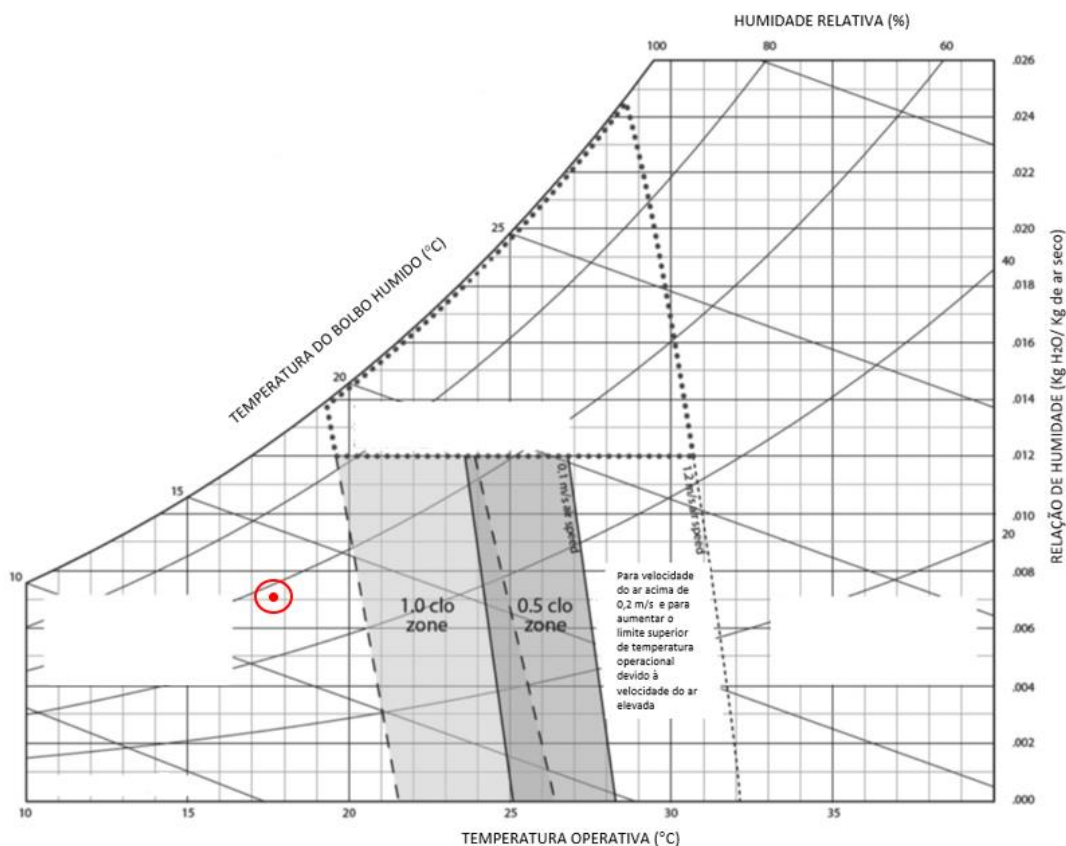


Figura 64 - Método da zona de conforto, para o dia mais frio no período de ocupação da zona do jardim de infância, nas salas de aulas, considerando a situação mais desfavorável (ASHRAE 55, 2017)

Na semana de 17 a 21 de junho, durante o período de ocupação do jardim de infância, a temperatura exterior varia de 17,0°C (às 08:00h) a 28,4°C (às 15:00h), e a temperatura interior varia de 21,7°C (às 08:00h) a 26,6°C (às 19:00h). As temperaturas interiores mínimas das salas de aulas $J_{0,1}$, $J_{0,2}$ e $J_{0,3}$, são de 21,7°C, 22,0°C e 22,0°C respetivamente e a temperatura interior máxima igual a 26,3°C, 26,5°C e 26,6°C respetivamente, a temperatura máxima é atingida às 19:00h dos dias 18, 19, 20 e 21 de junho,

devido ao sistema AVAC ser desligado a essa hora, por isso o período de desconforto está fora do período das aulas (que é das 08:00h às 12:00h e das 14:00h às 18:00h) (ver Figura 65).

Na semana mais quente, durante o período de ocupação do jardim de infância, a temperatura operativa nas salas de aulas $J_{0,1}$, $J_{0,2}$ e $J_{0,3}$, está no intervalo de conforto das 08:00h às 11:00h e às 19:00h no dia 17 de junho, das 08:00h às 09:00h no dia 18 e 20 de junho e das 08:00h às 10:00h do dia 21 de junho, porque a temperatura operativa está compreendida entre 20°C e 26°C (ver Figura 66).

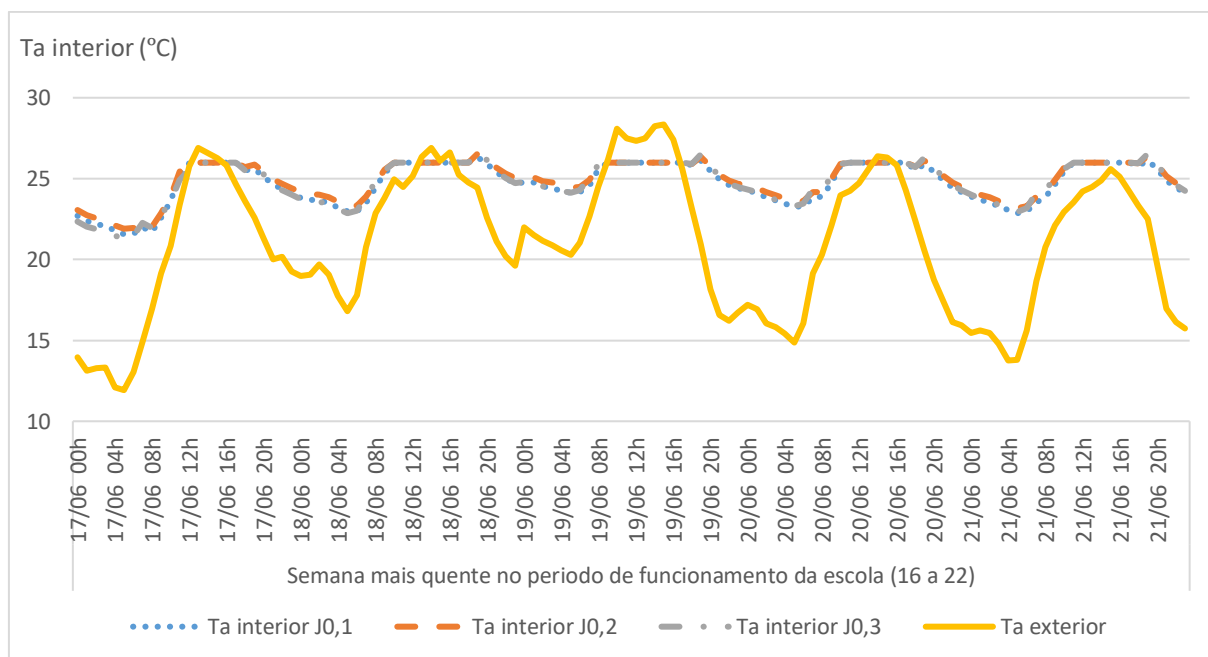


Figura 65 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – antes de reabilitação

No dia mais quente, a temperatura exterior varia de 25,0°C a 31,5°C e a temperatura interior varia de 24,1°C a 29,6°C, durante o período de ocupação do jardim de infância. A sala de aula $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ atingem maior valor de temperatura interior, de 29,3°C e 29,6°C respetivamente (às 15:00h), e a sala de aula $J_{0,3}$ atinge o maior valor de temperatura interior, de 28,2°C (às 19:00h), verifica-se que o sistema AVAC não é eficiente grande parte da manhã (10:00h às 12:00h) e durante toda a tarde (14:00h às 19:00h) no dia mais quente (ver Figura 67). As temperaturas interiores das três salas de aulas são relativamente próximas, pois a sala de aula $J_{0,3}$ está orientada a norte e as salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ estão orientadas a sul, mas estas duas últimas salas têm palas de sombreamento.

No dia 6 de julho, a temperatura operativa está no intervalo de conforto, das 08:00h às 09:00h nas salas de aulas $J_{0,1}$, $J_{0,2}$ e $J_{0,3}$ do jardim de infância. A temperatura operativa é superior a 26°C, durante 30 horas, pois não está no intervalo de conforto (ver Figura 68).

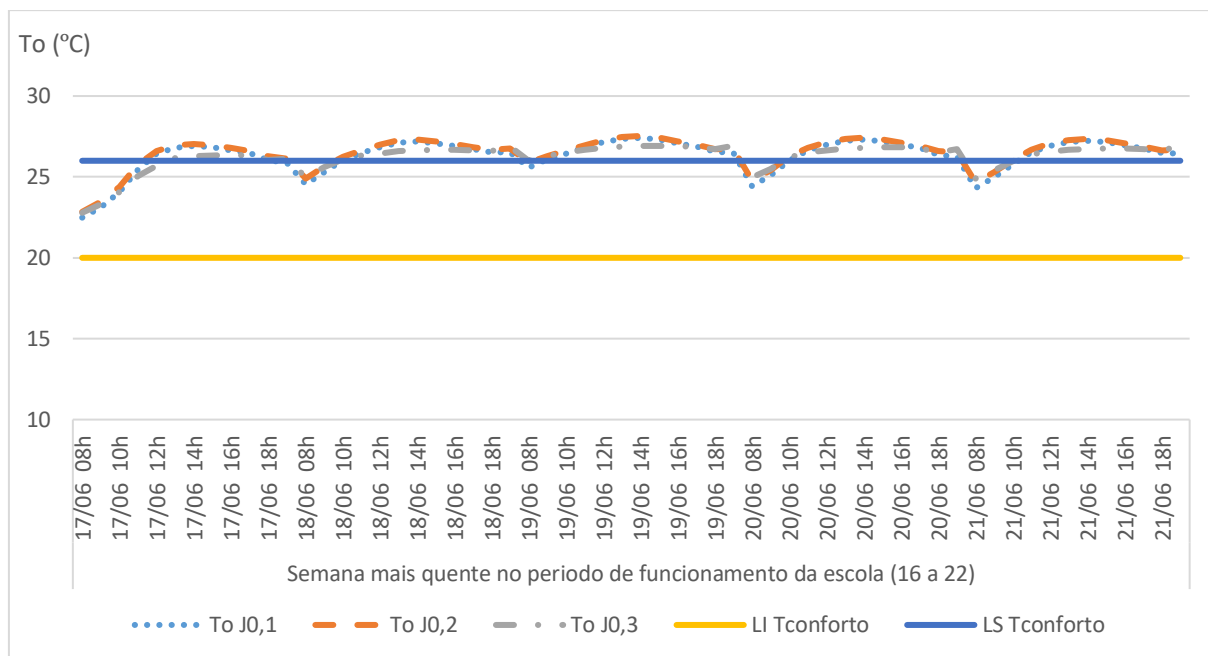


Figura 66 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – antes de reabilitação

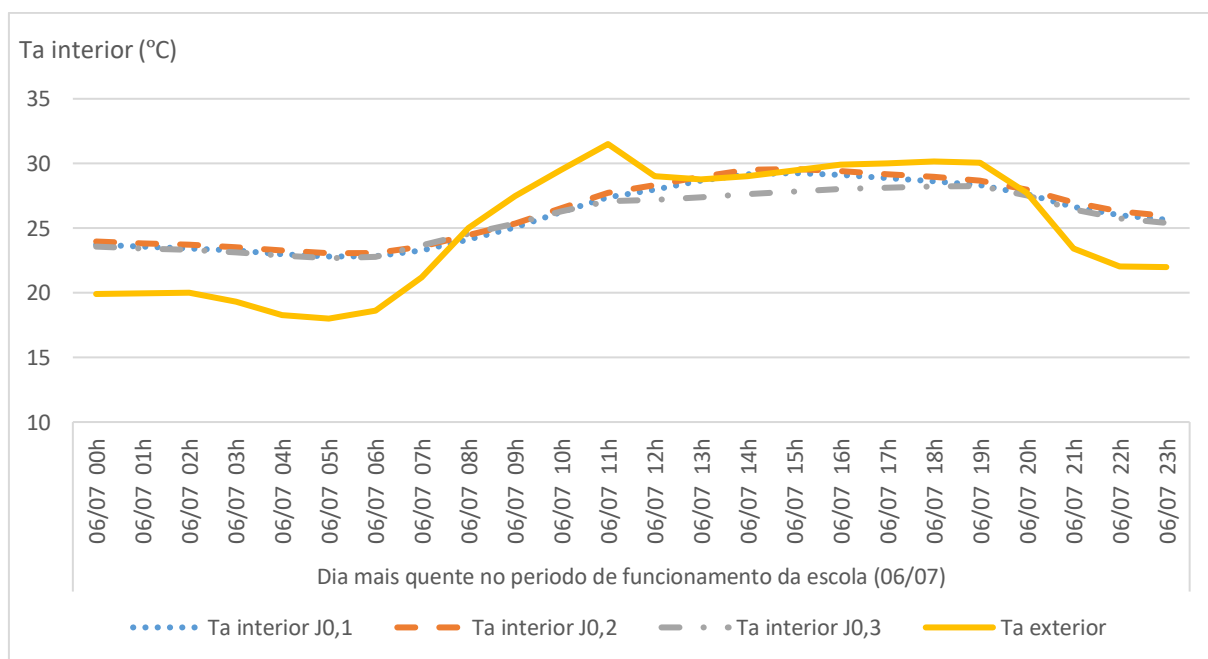


Figura 67 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – antes de reabilitação

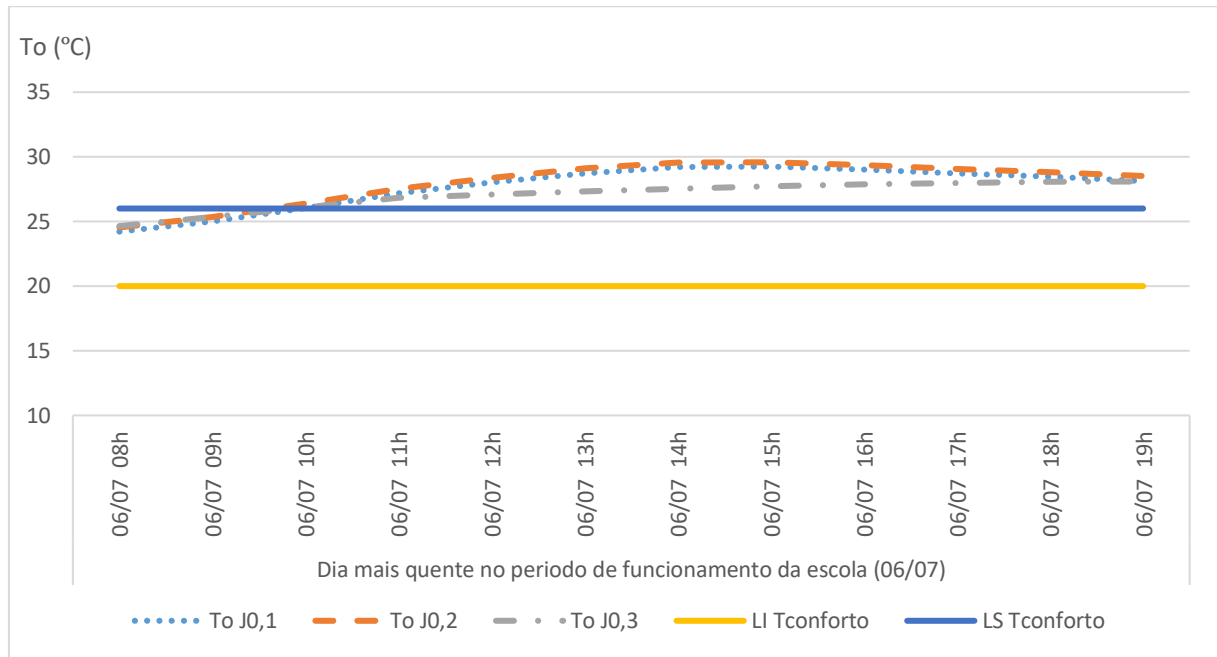


Figura 68 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – antes de reabilitação

Através da análise do conforto térmico, pelo método da zona de conforto (ASHRAE 55, 2017), para o dia 6 de julho no jardim de infância, as temperaturas operativas das salas de aulas $J_{0,1}$, $J_{0,2}$ e $J_{0,3}$, são de 26,16°C, 26,48°C e 25,79°C respetivamente, tendo em conta que a taxa metabólica dos ocupantes é de 1,2 met, o isolamento do vestuário no inverno de 0,5 clo, a velocidade média do ar inferior a 0,1 m/s e a humidade relativa de 55,80%, verifica-se que os ocupantes da sala de aula $J_{0,1}$ e $J_{0,3}$, estão em conforto, e da sala de aula $J_{0,2}$, estão em desconforto (ver Figura 69). Contudo, a temperatura operativa da sala de aula $J_{0,2}$, está próxima da zona de conforto, logo uma possível solução, para a temperatura operativa atingir a zona de conforto, seria o aumento do isolamento térmico da envolvente opaca, diminuindo, assim, os ganhos de calor.

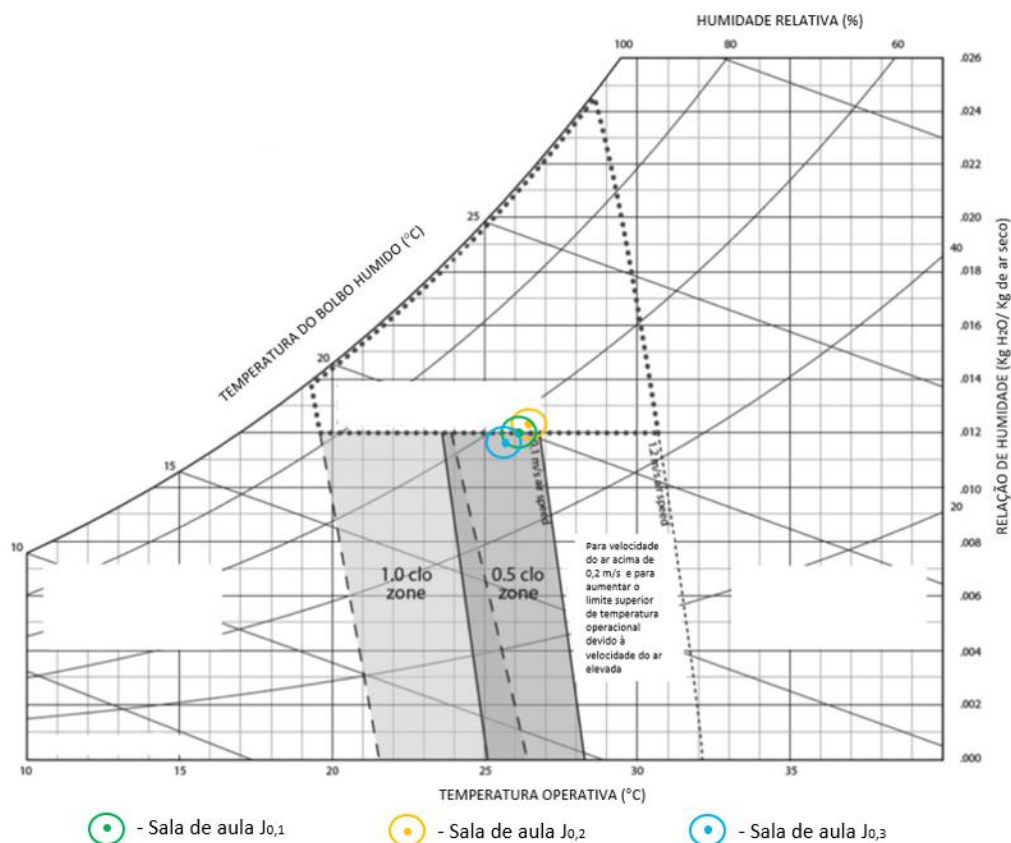


Figura 69 - Método da zona de conforto, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do jardim de infância, nas salas de aulas, considerando a situação mais desfavorável (ASHRAE 55, 2017)

4.2.1.2. Necessidades de aquecimento e arrefecimento da zona do jardim de infância

A análise para as necessidades de aquecimento e arrefecimento da zona do edifício, foi realizada por mês, tendo em conta que o jardim de infância está encerrado no mês de agosto. O edifício em estudo não possui sistemas de arrefecimento, mas possui radiadores com armazenamento para aquecimento, contudo para a simulação foi considerado um sistema simples AVAC, que utiliza o “District Heating and Cooling”, que tem um COP /EER, igual a um, pois não se sabe as características e perfil de utilização dos radiadores e é possível que estes não garantam as necessidades de aquecimento do edifício.

Anualmente o consumo de energia para suprir as necessidades energéticas de aquecimento da zona do jardim de infância é de sensivelmente 35,7kWh/m². Os meses com necessidades de aquecimento estão compreendidos entre outubro e maio, sendo o mês de janeiro o mais frio, logo é o que apresenta maiores necessidades de aquecimento, com um valor de 8,0kWh/m² (ver Figura 70).

Anualmente o consumo de energia para suprir as necessidades energéticas de arrefecimento da zona do jardim de infância é de $1,5\text{kWh/m}^2$. Através da análise do gráfico da Figura 70, verifica-se que existem necessidades de arrefecer o edifício entre os meses de junho e setembro, dos quais os meses de julho e setembro apresentam as maiores necessidades de arrefecimento, com valores de $0,4\text{kWh/m}^2$ e $0,7\text{kWh/m}^2$, exceto o mês de agosto que não apresenta necessidades de arrefecimento, uma vez que o jardim de infância se encontra encerrado.

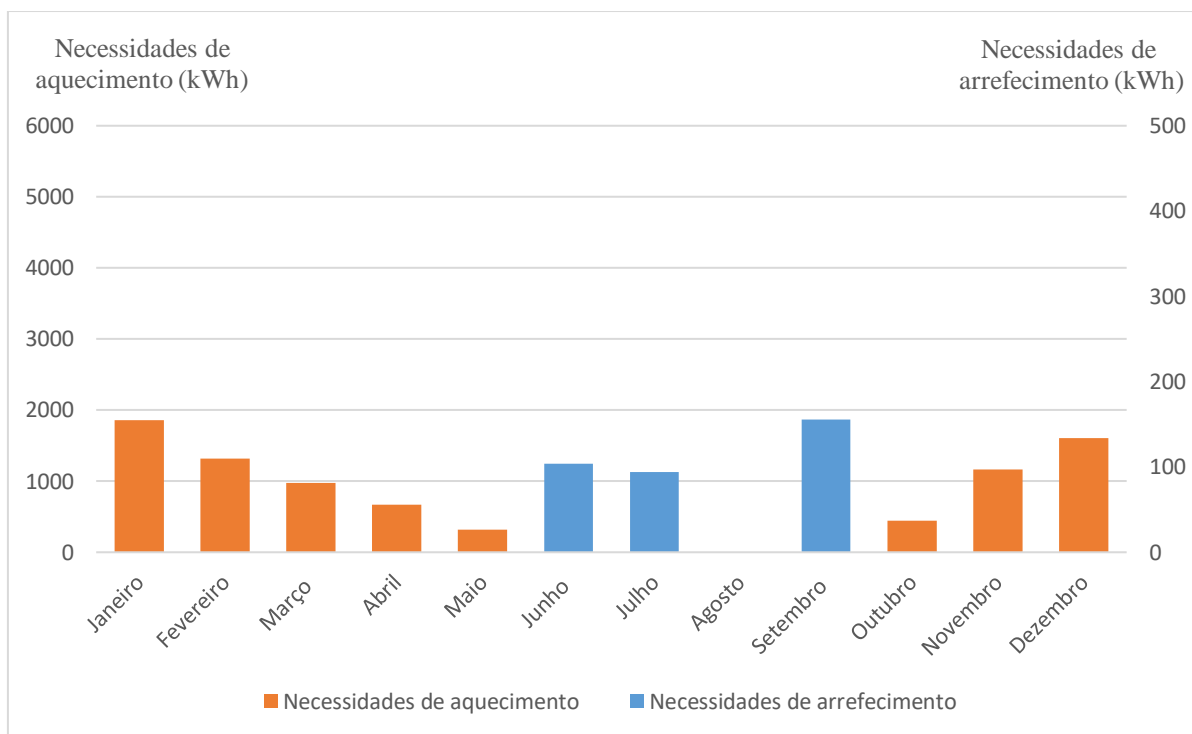


Figura 70 - Necessidades de arrefecimento por mês da zona do jardim de infância – sem reabilitação

As perdas através da envolvente, na zona do jardim de infância, são de $124,2\text{kWh/m}^2.\text{ano}$, das quais 55,9% são devidas às perdas através do envidraçados, 21,1% são devidas às perdas através das paredes, 13,9% são devidas às perdas através dos pavimentos e 9,1% são devidas às perdas através da cobertura. As perdas por ventilação e infiltração de ar, são de $51,6\text{kWh/m}^2.\text{ano}$ (33,6% através de ventilação e 66,4% através de infiltração). Os ganhos solares do edifício são de $123,9\text{kWh/m}^2.\text{ano}$.

4.2.2. Desempenho termo-energético da zona do ensino básico – 1º ciclo

4.2.2.1. Desempenho térmico da zona do ensino básico – 1º ciclo

Na semana de 21 a 25 de janeiro, durante o período de ocupação do ensino básico – 1º ciclo, a temperatura interior varia de 12,7°C a 20,1°C. Durante a semana, a temperatura interior vai aumentando a partir das 08:00h, até atingir uma temperatura de 20°C pelas 10:00h, e entre as 10:00h e as 19:00h a temperatura interior mantém-se constante nos 20°C, devido à existência de sistema AVAC, em que a temperatura interior mínima, no inverno, é de 20°C e o período de funcionamento deste é entre as 08:00h e as 19:00h, nas salas de aulas do ensino básico – 1º ciclo (ver Figura 71).

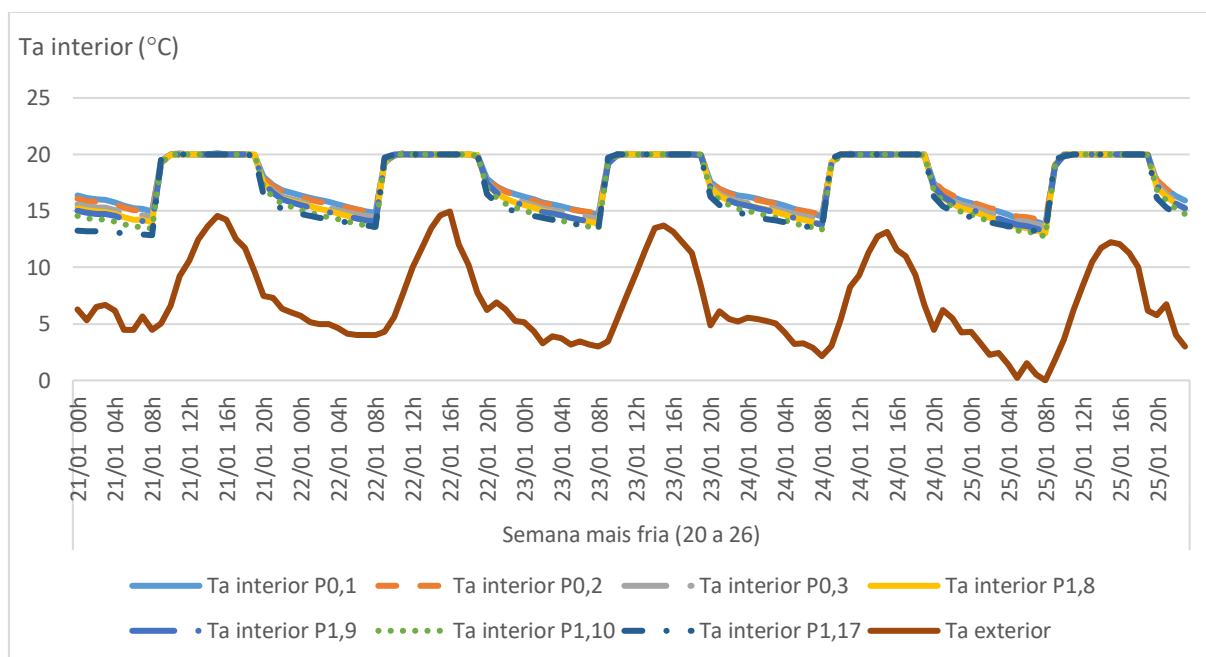


Figura 71 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação

Durante o período de ocupação, na semana mais fria, a temperatura operativa varia de 13,0°C (às 08:00h) a 20,7°C (às 12:00h). Nas salas de aulas do piso 0, as temperaturas operativas encontram-se em conforto, das 11:00h às 12:00h no dia 21, 22, 23 e 25 de janeiro (estão 4h em conforto durante a semana), pois a temperatura operativa está compreendida entre as 20°C e os 26°C. Nas salas de aulas

do piso 1 e na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, a temperatura operativa é inferior a 20°C , logo não se encontra no intervalo de conforto (ver Figura 72).

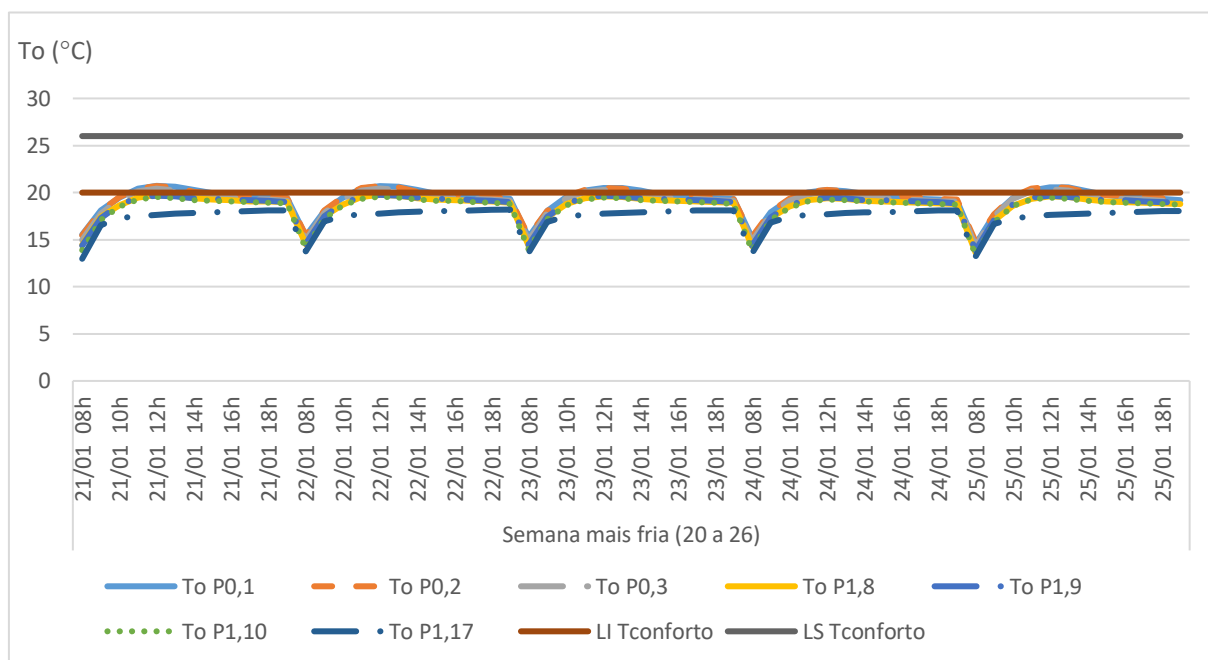


Figura 72 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação

Durante o inverno, no dia 2 de janeiro, verifica-se que no período de ocupação do ensino básico – 1º ciclo, a temperatura interior varia de $12,0^{\circ}\text{C}$ a $20,0^{\circ}\text{C}$. As salas de aulas do piso 0 e do piso 1 (orientadas a sudeste), têm temperatura interior superior à sala de aula $P_{1,17}$ (orientada a noroeste), devido aos ganhos solares. As salas de aulas do piso 0 têm uma temperatura interior superior às salas de aulas do piso 1, devido às menores perdas de calor do interior para o exterior da sala de aula. O sistema AVAC, liga às 08:00h em que a temperatura interior vai aumentando gradualmente até que atinge uma temperatura de 20°C pelas 10:00h, na sala de aula (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, mantendo as três salas de aulas a uma temperatura constante de 20°C , até às 19:00h, hora em que o sistema é desligado, começando a temperatura interior a diminuir novamente (ver Figura 73).

No dia mais frio, durante o período de ocupação do ensino básico – 1º ciclo, a temperatura operativa das salas de aulas (piso 0 e piso 1) e da sala de expressão plástica $P_{1,17}$ não estão no intervalo de conforto, pois a temperatura operativa é inferior a 20°C (ver Figura 74).

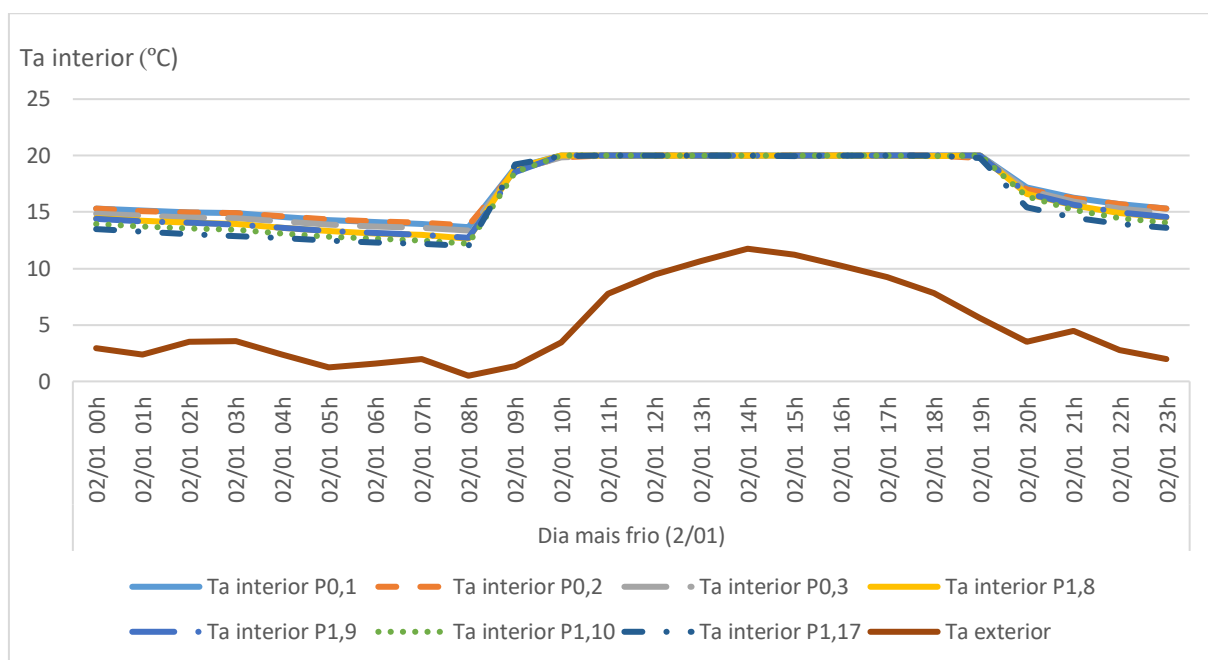


Figura 73 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação

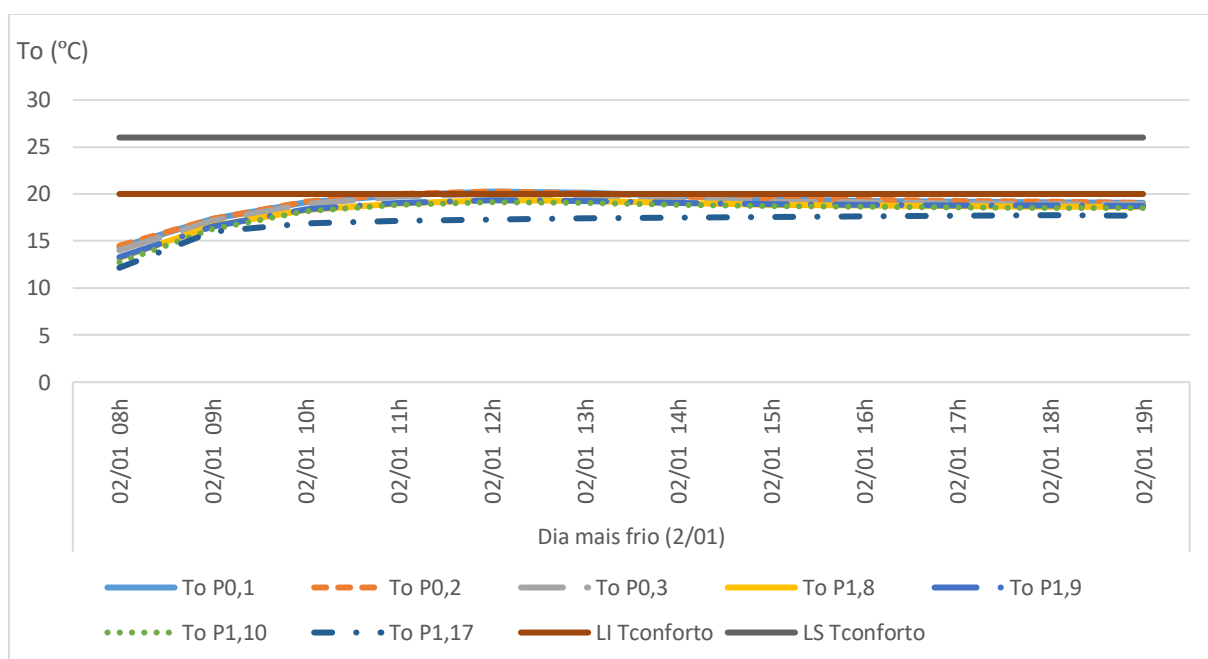


Figura 74 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação

Através da análise do conforto térmico, pelo método da zona de conforto (ASHRAE 55, 2017), para o dia 2 de janeiro no ensino básico – 1º ciclo, as temperaturas operativas das salas de aulas (piso 0 e piso 1) e da sala de expressão plástica P_{1,17}, variam de 15,14°C a 17,36°C, tendo em conta que a taxas

metabólicas dos ocupantes é de 1,2 met, o isolamento do vestuário no inverno de 1,0 clo, a velocidade média do ar inferior a 0,1 m/s e a humidade relativa de 55,80%, verifica-se que os ocupantes da sala de aula (piso 0 e piso1) e da sala de expressão plástica P_{1,17} estão em desconforto (ver Figura 75). Uma possível solução para que os ocupantes das salas de aulas do ensino básico – 1º ciclo, passem a estar em situação de conforto, seria o aumento do isolamento térmico das paredes exteriores, diminuindo, assim, as perdas de calor.

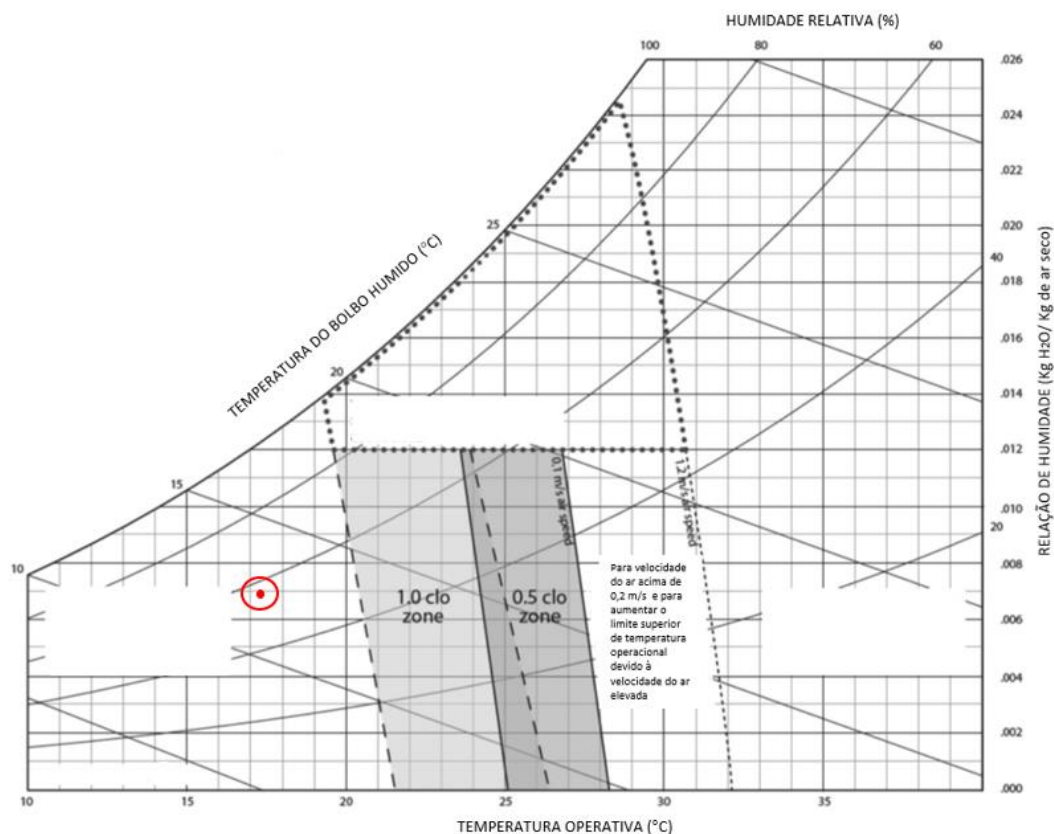


Figura 75 - Método da zona de conforto, para o dia mais frio no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica P_{1,17}, considerando a situação mais desfavorável (ASHRAE 55, 2017)

Na semana de 17 a 21 de junho, a temperatura interior varia de 20,9°C a 26,9°C, no período de ocupação do ensino básico – 1º ciclo. A temperatura interior das salas de aulas do piso 0, varia de 23,3°C a 26,6°C, das salas de aulas do piso 1, varia de 23,6°C a 26,9°C e a sala de expressão plástica P_{1,17}, varia de 20,9°C a 26,0°C. Nas salas de aulas do piso 0 e do piso 1, a temperatura interior chega aos 26°C aproximadamente a partir das 9:00h durante a semana, e a temperatura máxima é atingida às 19:00h, visto que o sistema AVAC é ligado às 08:00h e é desligado às 19:00h, ou seja, como o período de ocupação das salas de aulas é das 08:00h às 12:00h e das 14:00h às 18:00h, os ocupantes

encontram-se em conforto praticamente durante todo o dia (das 9:00h às 12:00h e das 14:00h às 18:00h), exceto no dia 17 de janeiro, em que a temperatura interior atinge os 26°C apenas das 14:00h às 17:00h, nas salas de aulas do piso 1 (ver Figura 76). A sala de expressão plástica P_{1,17}, tem menor temperatura interior que as salas de aulas (piso 0 e piso 1), porque não tem ganhos solares (orientada a noroeste), e as salas de aulas do piso 1, tem maior temperatura interior que as salas de aulas do piso 0, pois tem maiores ganhos de calor através das paredes exteriores e da cobertura.

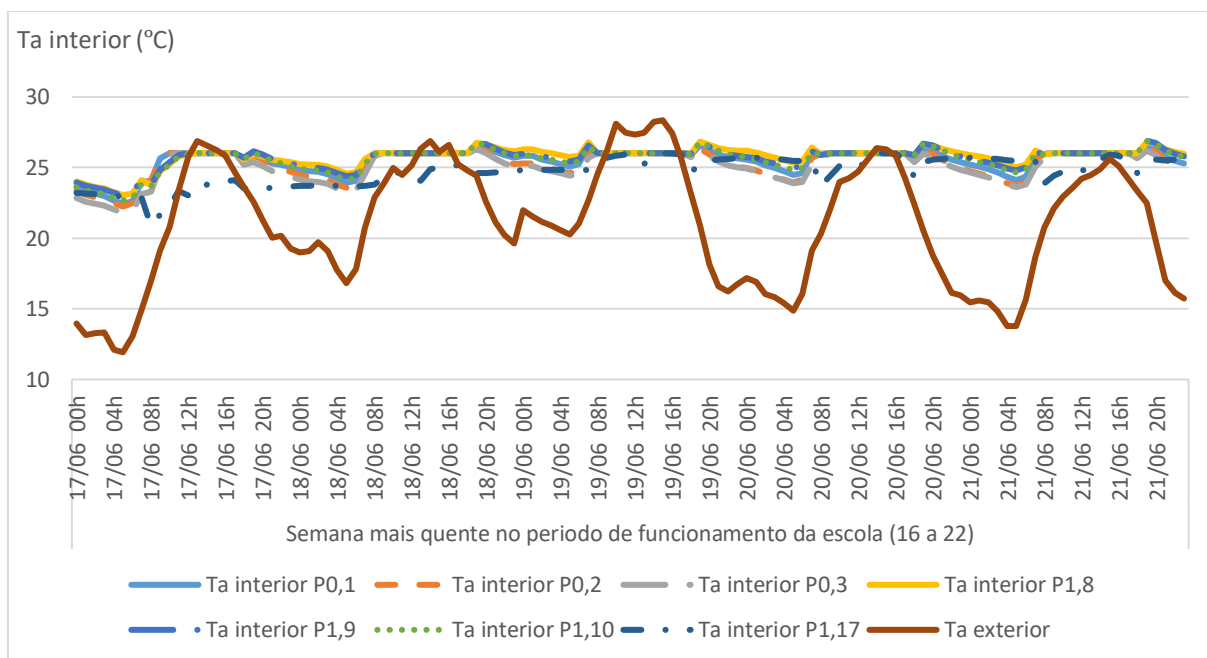


Figura 76 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação

Durante o período de ocupação, na semana mais quente, a temperatura operativa está no intervalo de conforto, das 08:00h às 10:00h no dia 17 de junho, nas salas de aulas do piso 1, e das 18:00h às 19:00h e no dia 17 de junho, na sala de aula P_{0,3}. A temperatura operativa é superior a 26°C (não se encontra no intervalo de conforto), nas salas de aulas P_{0,1} e P_{0,2} e a temperatura operativa está no intervalo de conforto, na sala de expressão plástica P_{1,17}, durante a semana (ver Figura 77).

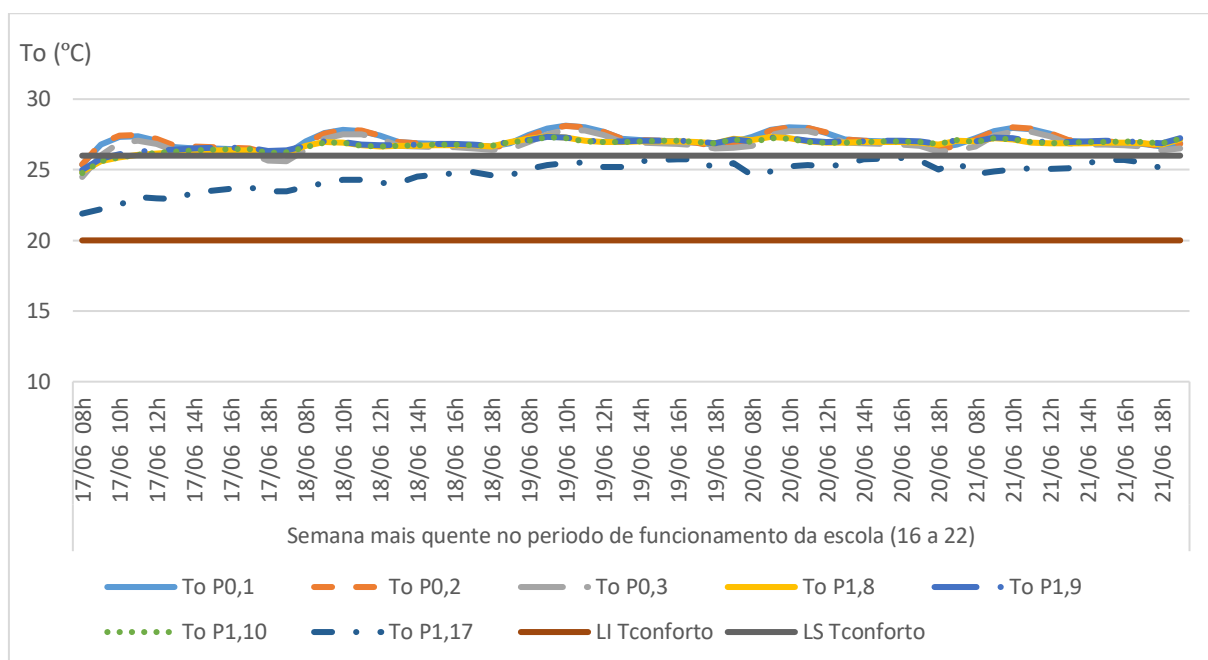


Figura 77 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação

No dia mais quente (19 de junho), durante o período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, a temperatura exterior varia de 20,9°C a 28,4°C, e a temperatura interior varia de 24,6°C a 26,8°C. A temperatura interior das salas de aulas do piso 0, varia de 25,7°C a 26,5°C, das salas de aulas do piso 1, varia de 26,0°C a 26,8°C e a sala de expressão plástica P_{1,17}, varia de 24,6°C a 26,0°C. Nas salas de aulas do piso 0 e do piso 1, a temperatura interior chega aos 26°C a partir das 08:00h, hora em que o sistema AVAC é ligado, e a temperatura interior máxima é atingida às 19:00h, devido ao sistema AVAC ser desligado a essa hora, contudo como o fim do período das aulas é até às 18:00h, os ocupantes encontram-se em conforto durante todo o dia. A sala de expressão plástica atinge os 26°C apenas entre as 15:00h e as 16:00h, porque tem menores ganhos através dos envidraçados, das paredes e da cobertura (está orientada a noroeste), em relação às salas de aulas (piso 0 e piso 1) que estão orientadas a sudeste (ver Figura 78).

Durante o período de ocupação do ensino básico – 1º ciclo, no dia 19 de junho, a temperatura operativa varia de 25,1°C a 28,1°C. A temperatura operativa na sala de expressão plástica P_{1,17} está no intervalo de conforto (temperatura operativa entre 20°C e 26°C), enquanto que nas salas de aulas do piso 0 e do piso 1, a temperatura operativa não está no intervalo de conforto (temperatura operativa superior a 26°C), durante o dia (ver Figura 79).

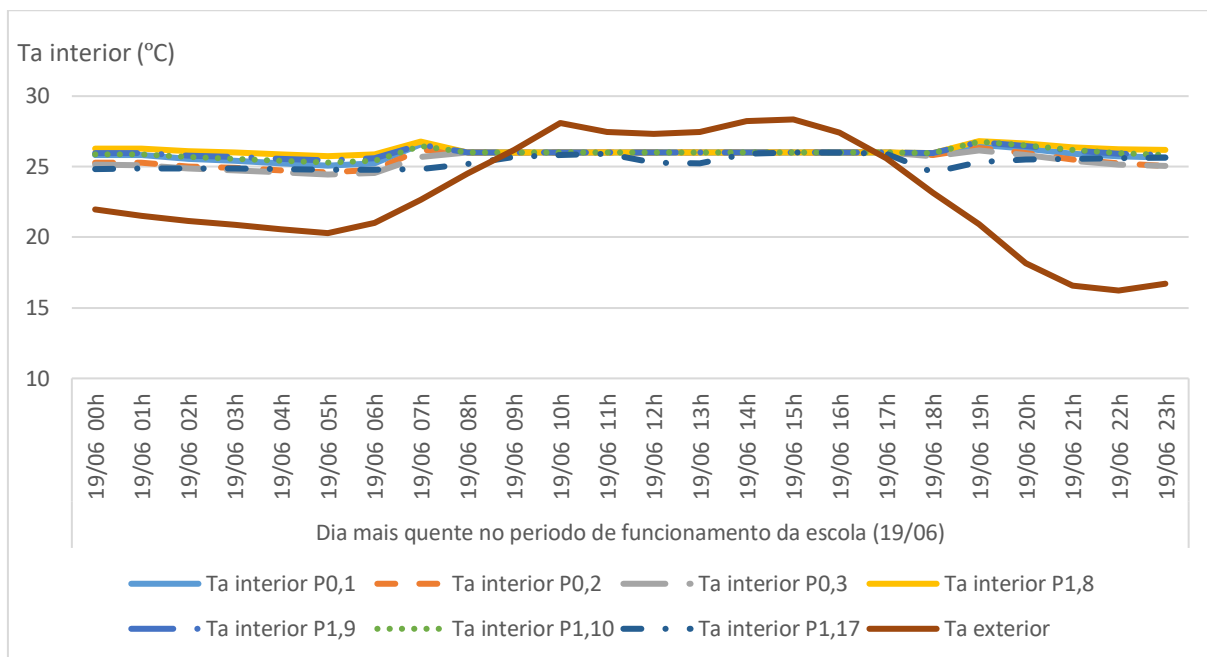


Figura 78 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação

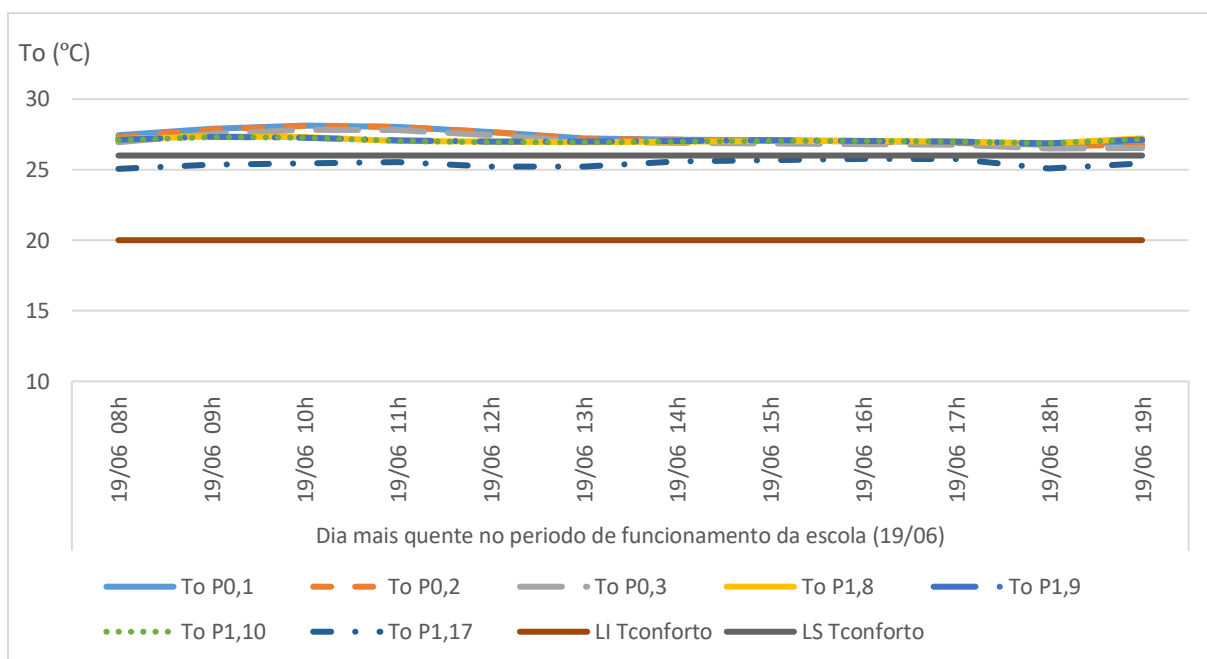


Figura 79 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – antes de reabilitação

Através da análise do conforto térmico, pelo método da zona de conforto (ASHRAE 55, 2017), para o dia 19 de junho no ensino básico – 1º ciclo, as temperaturas operativas das salas de aulas do piso 1 e das salas de aulas P_{0,1} e P_{0,2}, variam de 26,43°C a 26,80°C, da sala de aula P_{0,3} e da sala de expressão plástica

$P_{1,17}$ são de $26,22^{\circ}\text{C}$ e $25,33^{\circ}\text{C}$ respetivamente, tendo em conta que a taxa metabólica dos ocupantes é de 1,2 met, o isolamento do vestuário no inverno de 0,5 clo, a velocidade média do ar inferior a 0,1 m/s e a humidade relativa de 55,80%, verifica-se que os ocupantes da sala de aula $P_{0,3}$ e da sala de expressão plástica $P_{1,17}$ estão em conforto, enquanto que os ocupantes das salas de aulas do piso 1 e das salas de aulas $P_{0,1}$ e $P_{0,2}$ não estão em conforto, porque têm maiores ganhos solares e ganhos de calor através da envolvente opaca (ver Figura 80). Uma possível solução para que os ocupantes das salas de aulas do piso 1 e das salas de aulas $P_{0,1}$ e $P_{0,2}$, passem a estar em conforto, seria a colocação de palas de sombreamento, para diminuir os ganhos solares e o aumento do isolamento térmico das paredes exteriores, para diminuir a entrada de calor do exterior para o interior.

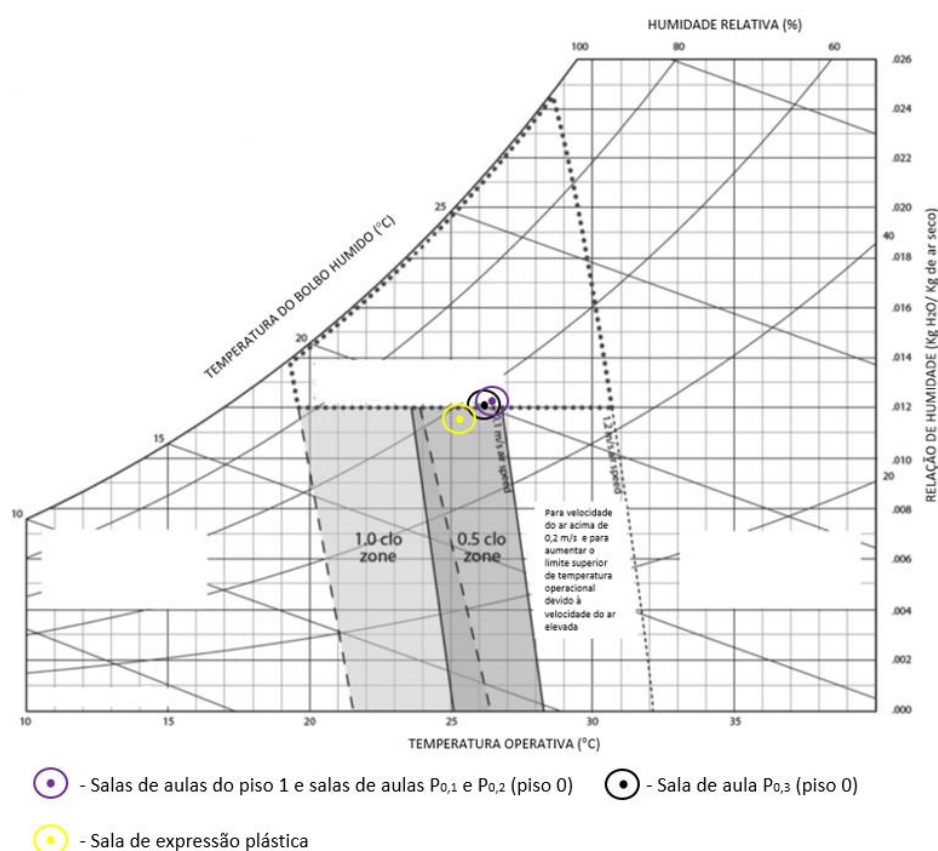


Figura 80 - Método da zona de conforto, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas (piso 1 e salas de aulas $P_{0,1}$ e $P_{0,2}$), sala de aula $P_{0,3}$ e sala de expressão plástica $P_{1,17}$, considerando a situação mais desfavorável (ASHRAE 55, 2017)

4.2.2.2. Necessidades de aquecimento e arrefecimento da zona do ensino básico – 1º ciclo

A análise para as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento da zona do edifício destinado ao ensino básico – 1º ciclo, foi realizada por mês, tendo em conta que o mesmo está encerrado no mês de julho e agosto. O edifício em estudo não possui sistemas de arrefecimento, mas possui radiadores com armazenamento para aquecimento, contudo para a simulação foi considerado um sistema simples AVAC, que utiliza o “District Heating and Cooling”, que tem um COP/EER igual a um, pois não se sabe as características e perfil de utilização dos radiadores e é possível que estes não garantam as necessidades de aquecimento do edifício. As necessidades energéticas anuais da zona do ensino básico – 1º ciclo, relativas ao aquecimento são de 28,9kWh/m² e devidas a arrefecimento são de 0,1kWh/m². O mês de janeiro é o mais frio, com 6,5kWh/m² de necessidades energéticas, existindo necessidades de aquecimento entre os meses de outubro e maio. O mês de junho e setembro apresentam necessidades de arrefecimento, de aproximadamente 0,5kWh/m² (ver Figura 81).

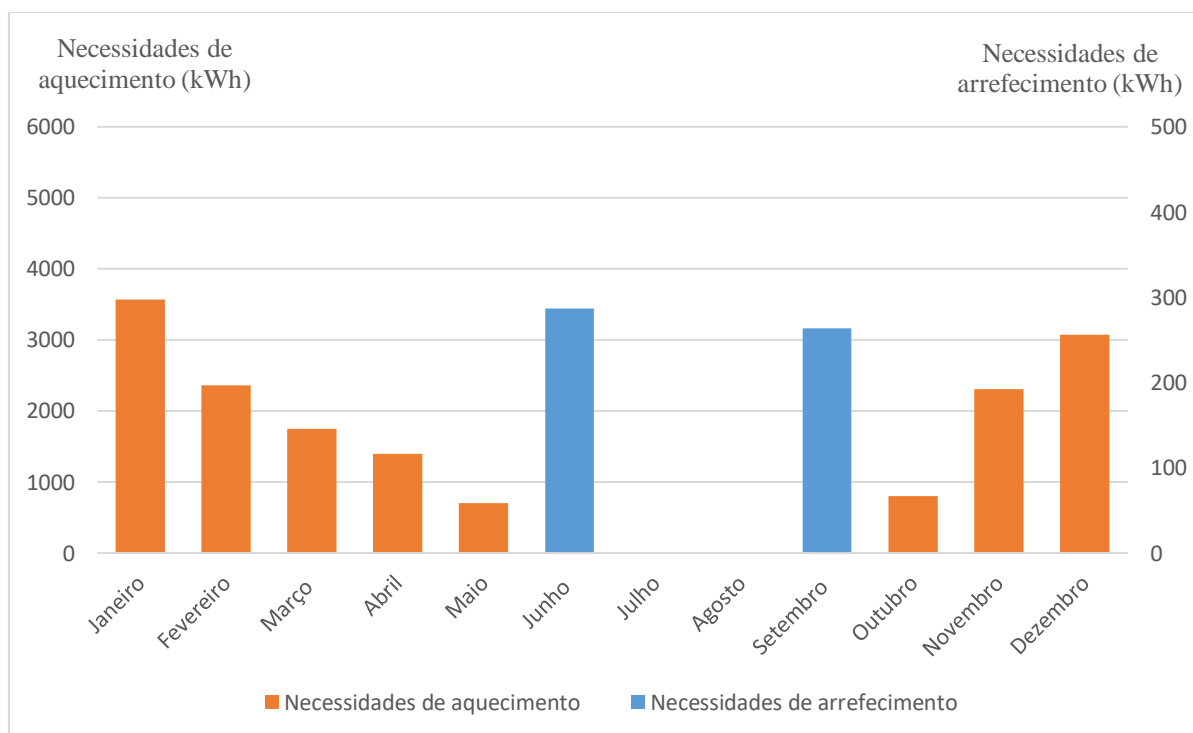


Figura 81 - Necessidades de arrefecimento por mês da zona do ensino básico – 1º ciclo – sem reabilitação

As perdas através da envolvente, na zona do ensino básico – 1º ciclo, são de 108,9kWh/m².ano, das quais 46,2% são devidas às perdas através do envidraçados, 29,2% são devidas às perdas através das paredes, 14,0% são devidas às perdas através dos pavimentos e 10,6% são devidas às perdas através da cobertura. As perdas por ventilação e infiltração de ar, são de 35,2kWh/m².ano (29,2% através de ventilação e 70,8% através de infiltração). Os ganhos solares do edifício são de 85,4kWh/m².ano.

4.2.3. Necessidade de aquecimento e arrefecimento do edifício

O mês de janeiro é o mais frio, logo é o que apresenta maiores necessidades de aquecimento, com um valor de 6,9kWh/m², e existem necessidades de arrefecimento nos meses de junho, julho e setembro, dos quais o mês de setembro apresenta o maior valor de necessidades de arrefecimento, com um valor de 0,5kWh/m² e o mês de julho apresenta o menor valor de necessidades de arrefecimento com um valor de 0,1kWh/m² (ver Figura 82).

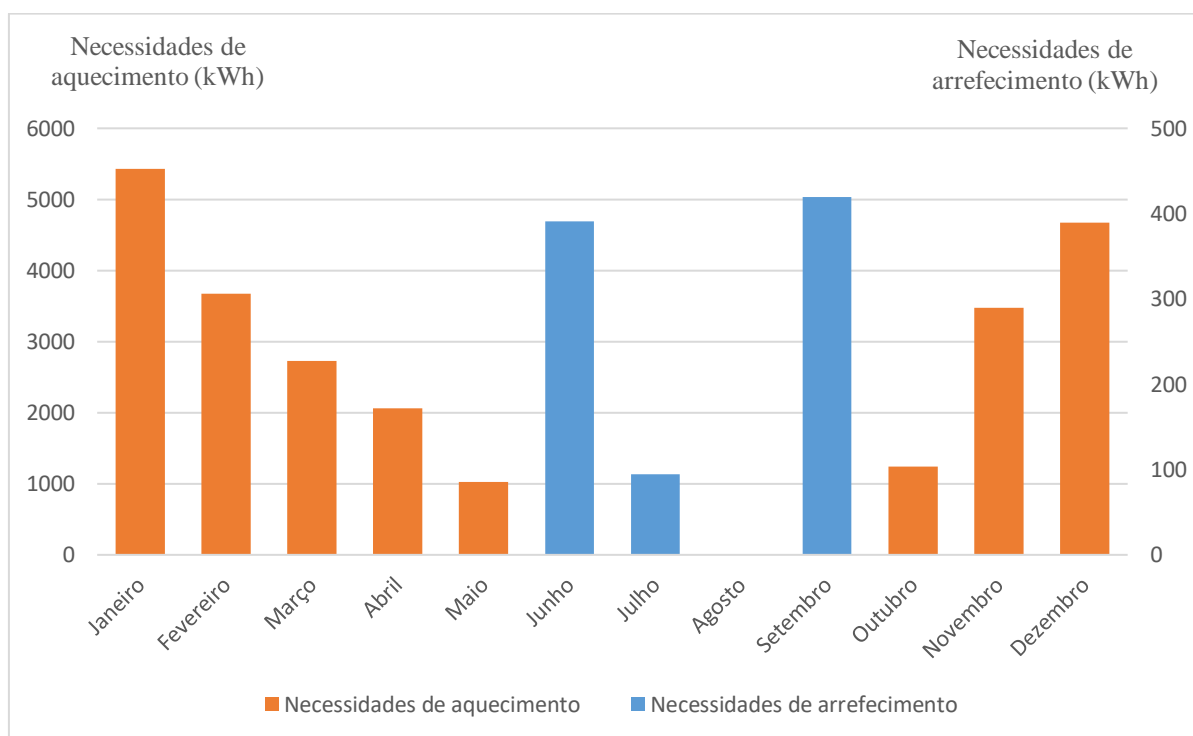


Figura 82 - Necessidades de arrefecimento por mês do edifício – sem reabilitação

As necessidades energéticas totais do edifício são de 32,1kWh/m².ano, 30,9kWh/m².ano relativas ao aquecimento e 1,2kWh/m².ano devidas a arrefecimento. A zona do ensino básico – 1º ciclo representa 65,6% das necessidades de aquecimento e 60,9% das necessidades de arrefecimento, e a zona do jardim de infância representa 34,4% das necessidades de aquecimento e 39,1% das necessidades de arrefecimento. As perdas através da envolvente são de 118,9kWh/m².ano, das quais 50,5% são devidas

às perdas através do envidraçados, 23,2% são devidas às perdas através das paredes, 15,2% são devidas às perdas através dos pavimentos e 11,1% são devidas às perdas através da cobertura. As perdas por ventilação e infiltração de ar, são de 42,6kWh/m².ano (29% através de ventilação e 71% através de infiltração). Os ganhos solares do edifício são de 104,8kWh/m².ano.

Através destes resultados, verifica-se que a zona do ensino básico – 1º ciclo apresenta maiores necessidades de aquecimento e arrefecimento, visto não possuir isolamento térmico nas paredes exteriores nem palas de sombreamento, ao contrário da zona do jardim de infância, logo é necessário implementar soluções de melhoria nesta zona, de forma a reduzir as necessidades energéticas.

4.3. Desempenho térmico da solução de reabilitação implementada para o edifício – sem sistema AVAC ativo

A seguir é apresentada a análise do desempenho do edifício com a solução de reabilitação implementada, que consiste na colocação de um sistema de isolamento contínuo pelo exterior (4 cm e revestimento em granito na zona inferior da parede e 6 cm rebocada nas restantes zonas), e na instalação de palas para sombreamento nas salas de aulas P_{0,1}, P_{0,2} e P_{0,3}. A zona do jardim de infância não foi sujeita a qualquer medida de melhoria, logo a análise relativa ao comportamento térmico do edifício em estudo apenas será realizada para a zona do edifício do ensino básico – 1º ciclo. A análise de desempenho do conforto térmico, sem sistema de climatização ativo, é realizada pelo modelo de conforto térmico adaptativo da ASHRAE 55 (ASHRAE 55, 2017). Para a semana e dia, mais frio e mais quente, sem sistema de climatização, foi feita a verificação se a temperatura operativa se encontra ou não no intervalo de conforto (sendo a temperatura mínima no inverno de 20°C e a temperatura máxima no verão de 26°C), pela norma EN 15251, tendo em conta que se trata de um edifício em fase de reabilitação (Categoria II) (EN 15251, 2006).

4.3.1. Desempenho térmico da zona do ensino básico – 1º ciclo

Na semana mais fria, durante o período de ocupação a temperatura interior varia de 10,8°C a 19,3°C. Nas salas do piso 1 (sala de aula P_{1,8}, P_{1,9} e P_{1,10}) o maior valor de temperatura máxima interior, 18,9°C, corresponde à sala de aula P_{1,8}, e o menor valor, de 18,4°C, corresponde à sala de aula P_{1,10}. Verifica-se, com a solução de reabilitação implementada, um aumento da temperatura interior, de 0,4°C, na sala de aula P_{1,8}, e de 0,5°C, na sala de aula P_{1,10}, devido à aplicação de sistema de isolamento pelo exterior.

A sala de aula $P_{0,3}$ é a que tem menor temperatura interior em relação às salas de aula $P_{0,1}$ e $P_{0,2}$, pois tem menores ganhos solares, verifica-se uma diminuição de aproximadamente $0,6^{\circ}\text{C}$ da temperatura interior na sala de aula $P_{0,1}$ e $P_{0,2}$, e de $0,9^{\circ}\text{C}$, na sala de aula $P_{0,3}$, devido ao maior efeito da instalação das palas de sombreamento, em relação à implementação do sistema de isolamento exterior. Na sala de expressão plástica $P_{1,17}$ também se verifica um ligeiro aumento da temperatura, devido à colocação de sistema de isolamento pelo exterior. Anualmente, existe uma redução das perdas através da envolvente opaca, de 27,7%, e uma redução dos ganhos solares, de 22,2%, com a solução de reabilitação implementada (ver Figura 83).

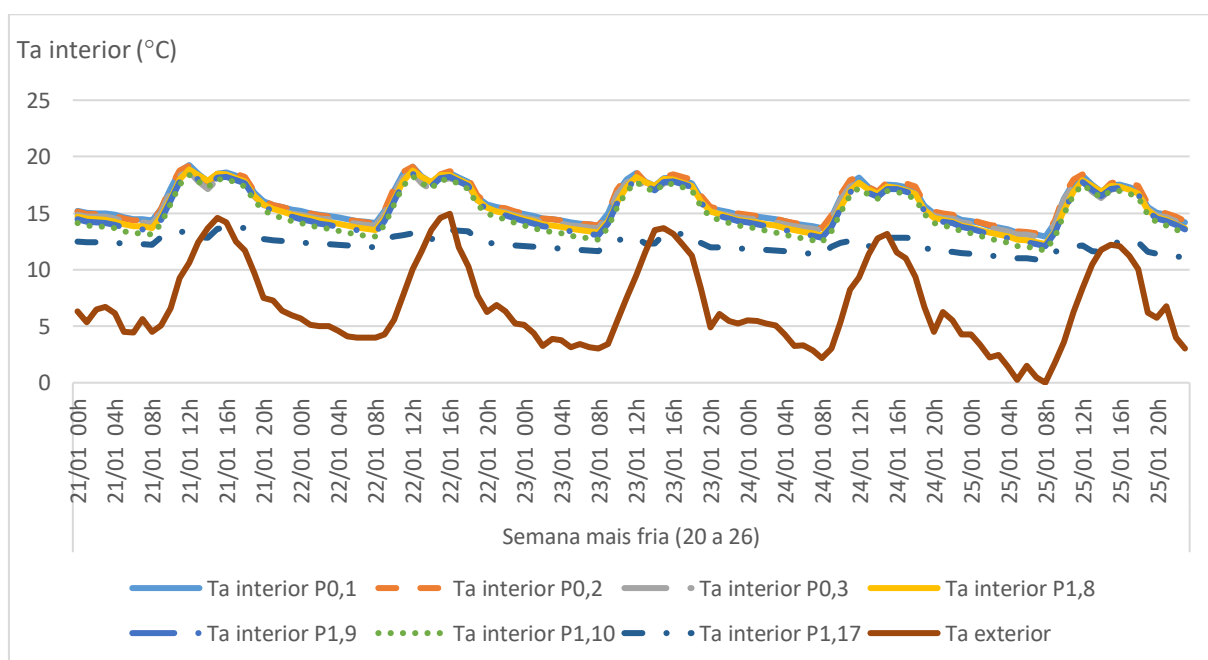


Figura 83 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação

Durante o período de ocupação a temperatura operativa varia de $11,2^{\circ}\text{C}$ (às 08:00h) a $19,2^{\circ}\text{C}$ (às 12:00h). Através da análise da Figura 84, verifica-se que em todas as salas de aulas do ensino básico – 1º ciclo, a temperatura operativa é inferior a 20°C . Nas salas de aulas do piso 1 e na sala de expressão plástica $P_{1,17}$ existe um aumento de temperatura operativa, uma média de $1,3^{\circ}\text{C}$ nas salas de aulas, e na sala de expressão plástica $P_{1,17}$ de $0,4^{\circ}\text{C}$, devido à colocação de um sistema de isolamento térmico contínuo pelo exterior. Nas salas de aulas do piso 0, existe uma diminuição de temperatura operativa, uma média de $1,2^{\circ}\text{C}$, consequência da instalação de palas de sombreamento (incluindo o sistema de isolamento contínuo pelo exterior).

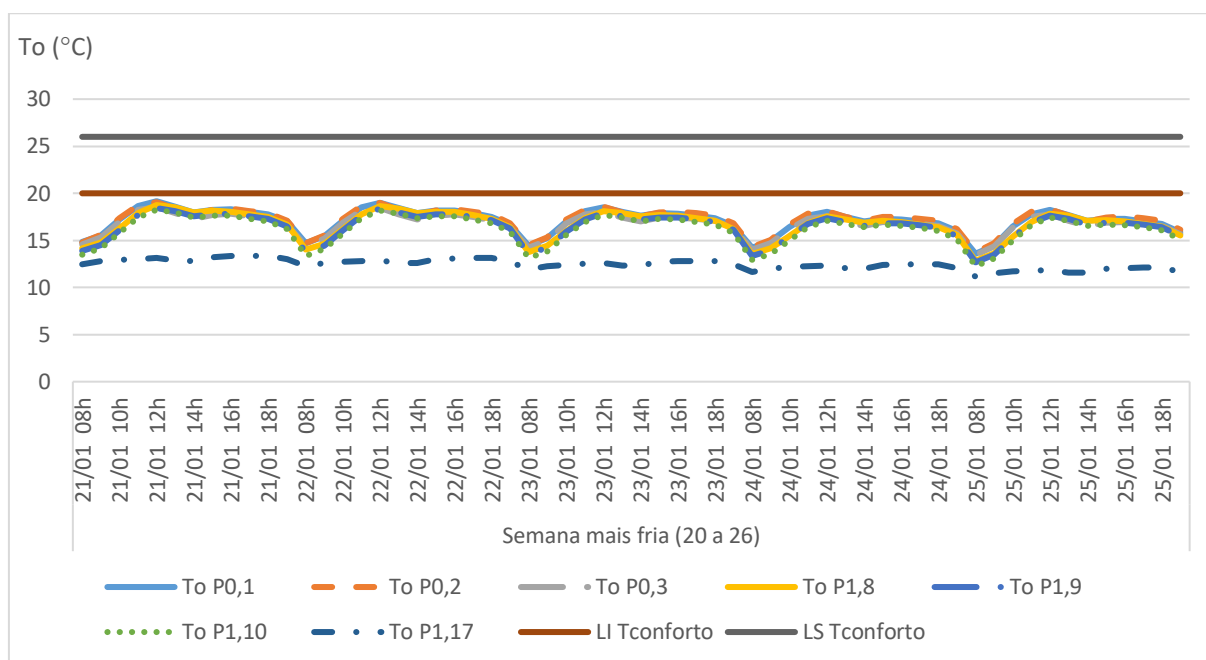


Figura 84 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação

No dia mais frio, 2 de janeiro, através das Figuras 85, verifica-se que a temperatura interior das salas de aulas é superior à sala de expressão plástica $P_{1,17}$, pois as salas de aulas estão orientadas a sudeste e a sala de expressão plástica $P_{1,17}$ está orientada noroeste, correspondendo o maior valor de temperatura interior à sala de aula $P_{0,1}$ e o menor valor à sala de aula $P_{1,10}$. Comparando as temperaturas ambientes interiores das salas de aulas, antes e após a solução de reabilitação implementada, verifica-se que existe um aumento da temperatura interior nas salas do piso 1 e na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, uma média de 0,4°C, e uma diminuição da temperatura interior nas salas do piso 0, uma média de 1,6°C, pois para além da aplicação do sistema de isolamento pelo exterior em todas as salas de aulas, o piso 0 tem palas de sombreamento, diminuindo os ganhos solares (o efeito das palas de sombreamento sobrepõem-se ao efeito do sistema de isolamento pelo exterior). As salas de aula do piso 1 têm um valor de temperatura interior inferior às salas de aula do piso 0, devido às perdas através da cobertura.

Durante o período de ocupação, no dia 2 de janeiro, antes e após a solução de reabilitação implementada, a temperatura operativa é inferior a 20°C. A temperatura operativa das salas de aulas do piso 0 diminuíram, enquanto que as temperaturas das salas de aulas do piso 1 e a sala de expressão plástica $P_{1,17}$ aumentaram, devido ao sistema de isolamento térmico pelo exterior e às palas de sombreamento nas salas de aulas do piso 0. A temperatura operativa, no dia mais frio, varia de 9,0°C a 17,3°C (ver Figura 86).

No dia 2 de janeiro, a análise de conforto térmico não foi feita (a temperatura exterior média mensal é inferior a 9,4°C).

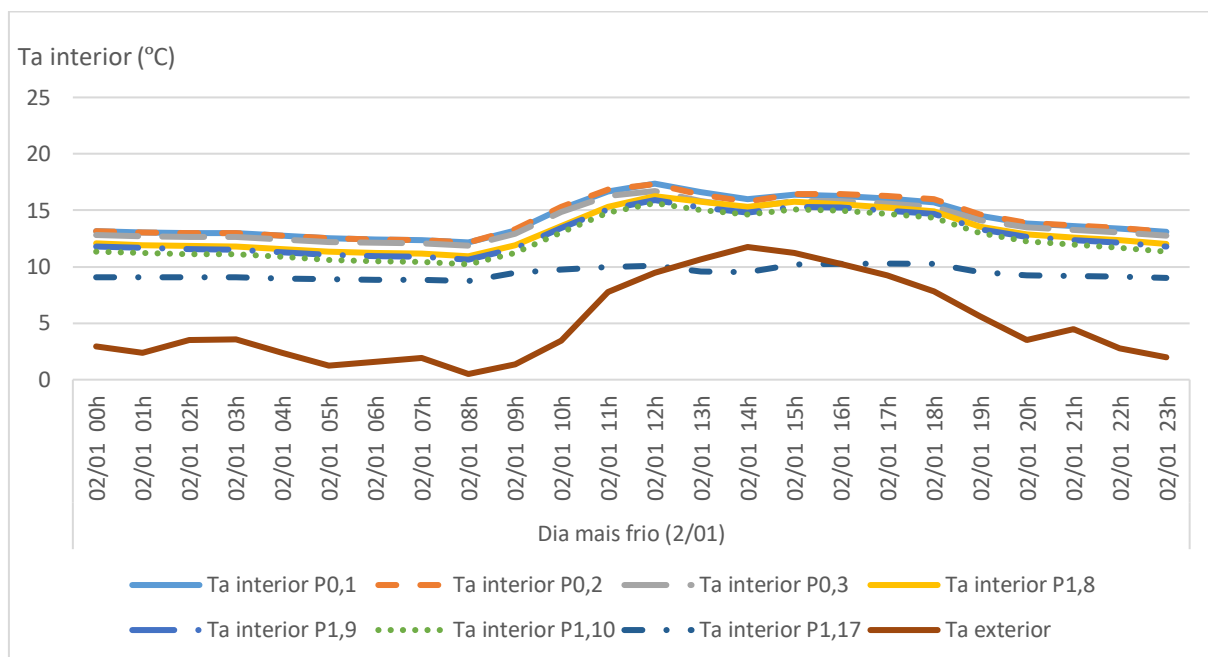


Figura 85 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação

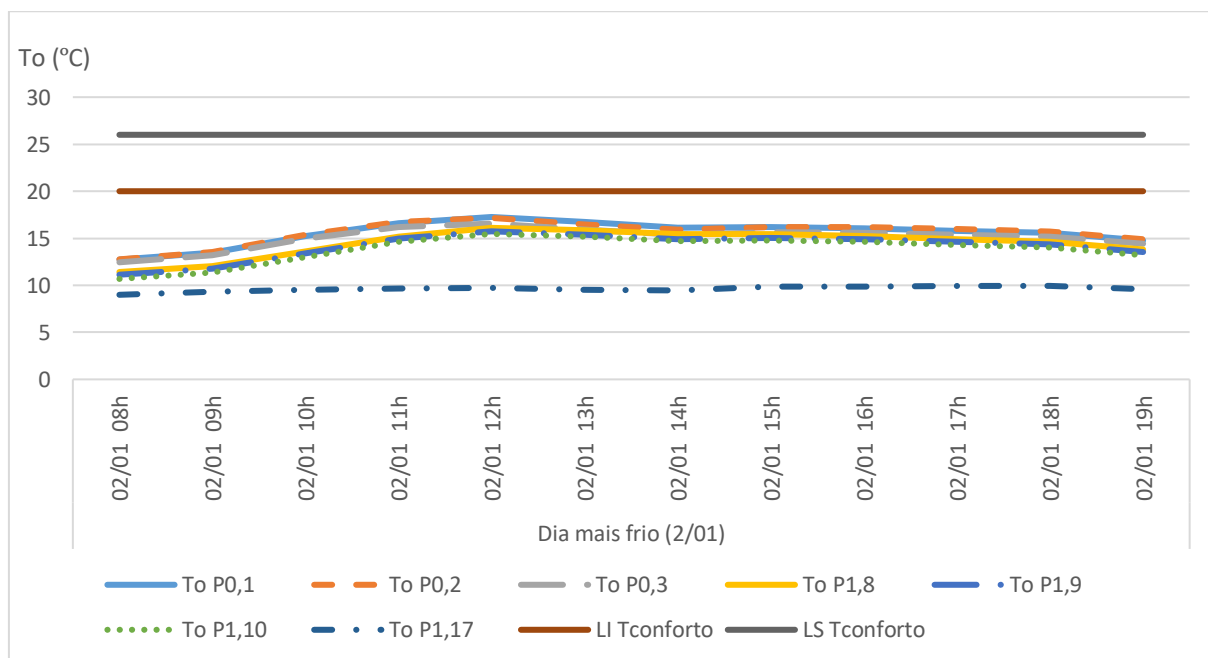


Figura 86 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação

Na semana mais quente no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo (de 17 a 21 de junho), a temperatura interior varia de 20,9°C a 29,6°C, sendo que nas salas do piso 0, varia de 21,6°C a 28,5°C, nas salas do piso 1, varia de 23,5°C a 29,6°C, e na sala de expressão plástica P_{1,17} varia de 20,9°C e 26,3°C. Antes de implementar a solução de reabilitação, as salas do piso 0, do piso 1 e a sala de expressão plástica P_{1,17}, tinham uma temperatura máxima de 31,9°C, de 30,0°C e de 26,4°C, ou seja, com a colocação de um sistema de isolamento contínuo pelo exterior e as palas de sombreamento no piso 0, verifica-se que a temperatura ambiente interior das salas diminuiu, existindo uma maior redução de temperatura interior nas salas do piso 0, devido ao efeito das palas de sombreamento. Durante o ano, existe uma redução das perdas através da envolvente opaca, de 24,2%, e uma redução dos ganhos solares, de 32,5%, após a implementação da solução de reabilitação (ver Figura 87).

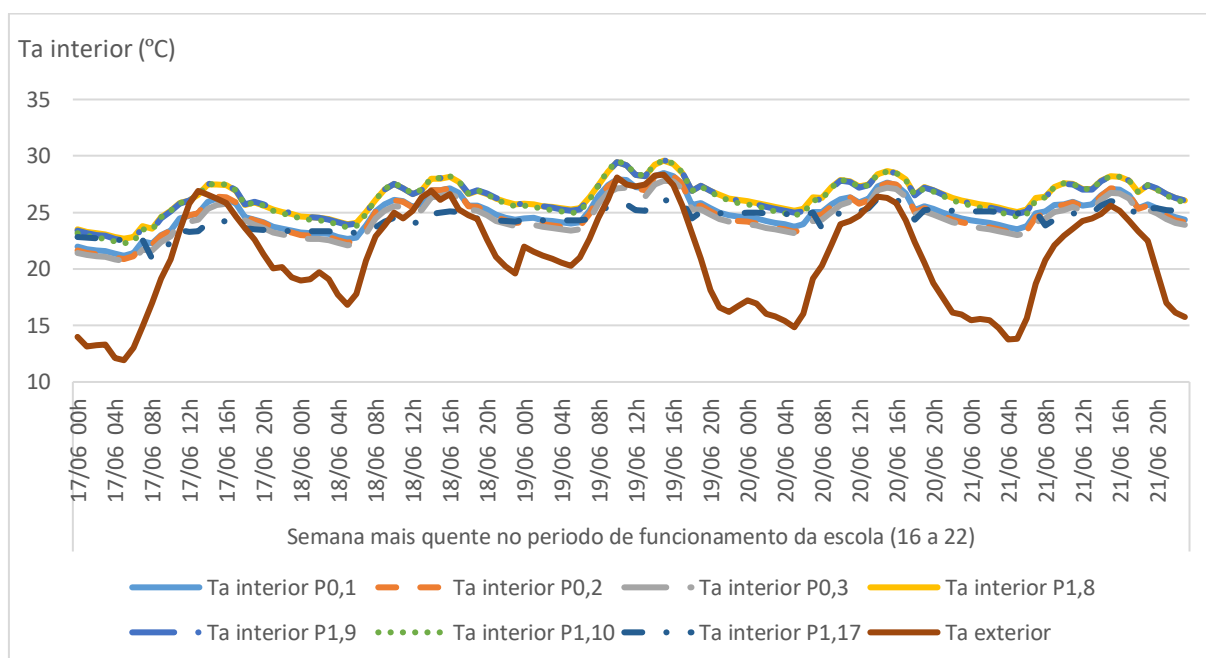


Figura 87 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação

No período de utilização da zona do ensino básico – 1º ciclo, a temperatura operativa é superior a 26°C, expeto das 08:00h às 10:00h do dia 17 de junho nas salas de aulas do piso 1. Nas salas de aulas do piso 0, a temperatura operativa encontra-se no intervalo de conforto das 08:00h às 12:00h e das 14:00h às 19:00h do dia 17 de junho, das 08:00h às 12:00h e das 18:00h às 19:00h no dia 18 de junho, às 08:00h do dia 20 de junho e das 18:00 às 19:00h no dia 21 de junho, nas salas de aula P_{0,1} e P_{0,2}. Na sala de aula P_{0,3}, a temperatura operativa está no intervalo de conforto no dia 17 e 23 de junho, das 08:00h às 12:00h, das 14:00h às 15:00h e das 18:00 às 19:00h no dia 18 de junho, das 18:00 às

12:00h do dia 19 para o dia 20 junho e do dia 20 para o dia 21 junho, e das 18:00h às 11:00h do dia 21 para o dia 22 junho. Nas salas de aulas do piso 1, a temperatura operativa encontra-se no intervalo de conforto das 08:00h às 10:00h do dia 17 de junho. Na sala de expressão plástica P_{1,17}, a temperatura operativa está compreendida entre os 20°C e os 26°C (ver Figura 88).

Comparando as temperaturas operativas das salas de aulas antes e após a implantação da solução de reabilitação, verifica-se que nas salas de aulas do piso 1 e na sala de expressão plástica P_{1,17} a temperatura operativa diminuiu, entre 0,1°C e 0,4°C, devido ao efeito do sistema de isolamento contínuo exterior, que faz com que as trocas de calor entre o exterior e o interior do espaço diminuam. Nas salas de aulas do piso 0, existe uma maior diminuição da temperatura operativa, de aproximadamente 4,0°C, isto deve-se ao sistema de isolamento térmico contínuo exterior e principalmente às palas de sombreamento, diminuindo os ganhos solares.

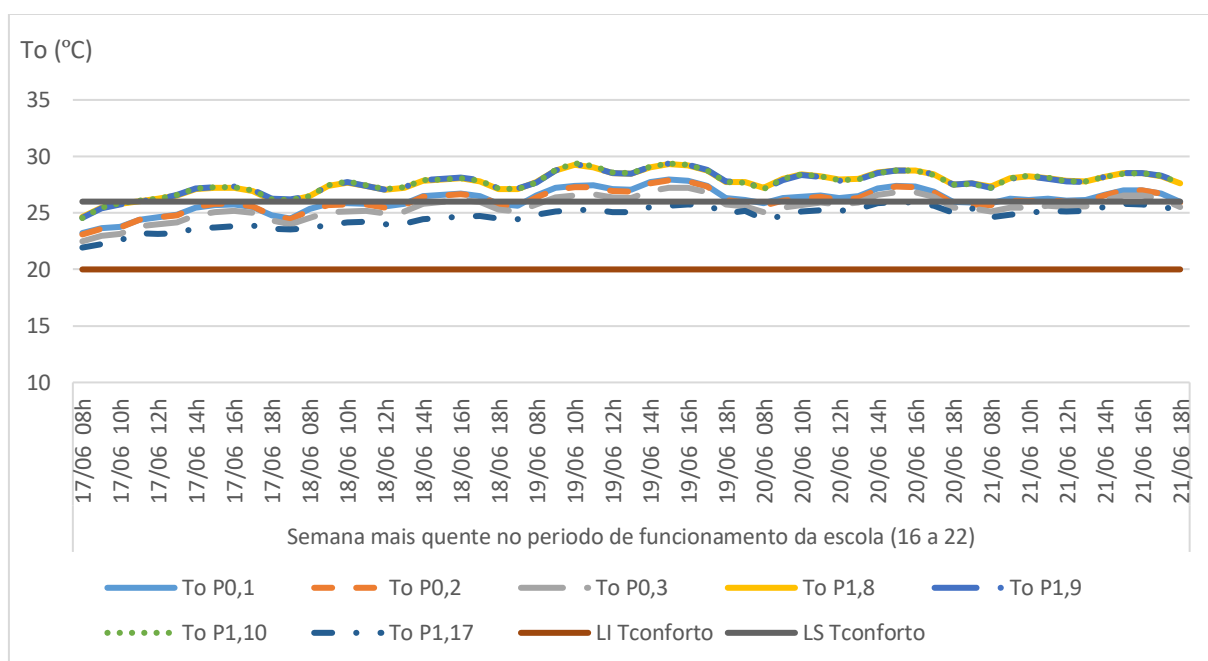


Figura 88 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação

No dia 19 de junho, dia mais quente no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, a temperatura exterior varia de 20,9°C (às 19:00h) a 28,4°C (às 15:00h), e a temperatura interior varia de 24,5°C (às 18:00h) a 29,6°C (às 15:00h). As salas de aula do piso 0 e do piso 1 apresentam valores de temperatura interior superiores das 08:00h às 12:00h e das 14:00h às 18:00h, que variam de 25,8°C a 29,5°C, e de 27,1°C a 29,6°C respetivamente. A sala de expressão plástica P_{1,17} apresenta valores de temperatura interior menores, que variam de 24,3°C a 26,1°C, no seu período de utilização (ver Figura

89), pois está orientada a noroeste enquanto que as salas de aulas (piso 0 e piso 1) estão orientadas a sudeste.

Após a implantação da solução de reabilitação, verifica-se que a temperatura interior de todas as salas diminui. Nas salas de aulas do piso 1 e na sala de expressão plástica P_{1,17} a temperatura interior diminui, entre 0,2°C e 0,4°C, devido ao efeito do sistema de isolamento térmico contínuo exterior, que faz com que as trocas de calor entre o exterior e o interior do espaço diminua. Nas salas de aulas do piso 0, existe uma maior diminuição da temperatura operativa, de aproximadamente 2,9°C, isto deve-se ao sistema de isolamento térmico contínuo exterior e principalmente às palas de sombreamento, diminuindo os ganhos solares.

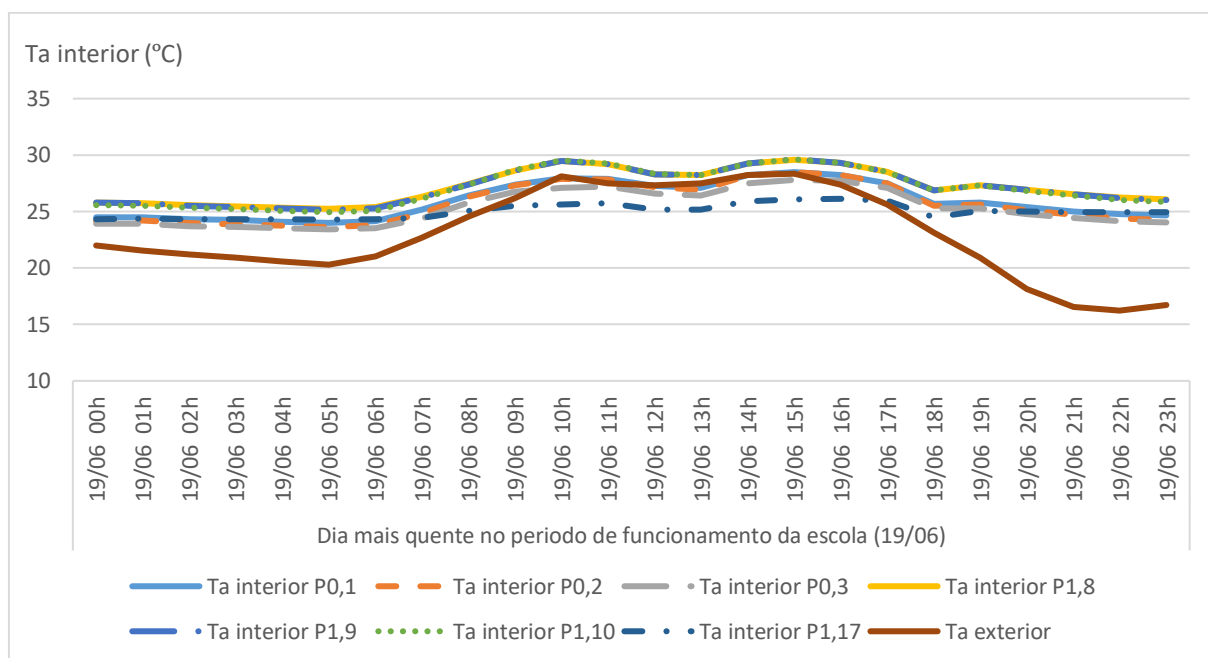


Figura 89 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação

A temperatura operativa no dia 19 de junho varia de 24,8°C a 29,4°C. Durante o dia mais quente, a temperatura operativa é superior a 26°C, expeto e na sala de expressão plástica P_{1,17}, e na sala de aula P_{0,3} das 18:00h às 19:00h, onde a temperatura operativa está no intervalo de conforto (ver Figura 90).

Comparando as temperaturas operativas das salas de aulas antes e após a implantação da solução de reabilitação, verifica-se que nas salas de aulas do piso 1 e na sala de expressão plástica P_{1,17} a temperatura operativa diminui, entre 0,3°C e 0,5°C, devido ao efeito do sistema de isolamento térmico contínuo exterior, que faz com que as trocas de calor entre o exterior e o interior do espaço diminuam, e nas salas

de aulas do piso 0, existe uma maior diminuição da temperatura operativa, de aproximadamente $3,8^{\circ}\text{C}$, isto deve-se para além da redução das trocas de calor com o exterior devido ao sistema de isolamento térmico contínuo exterior, às palas de sombreamento, diminuindo os ganhos solares.

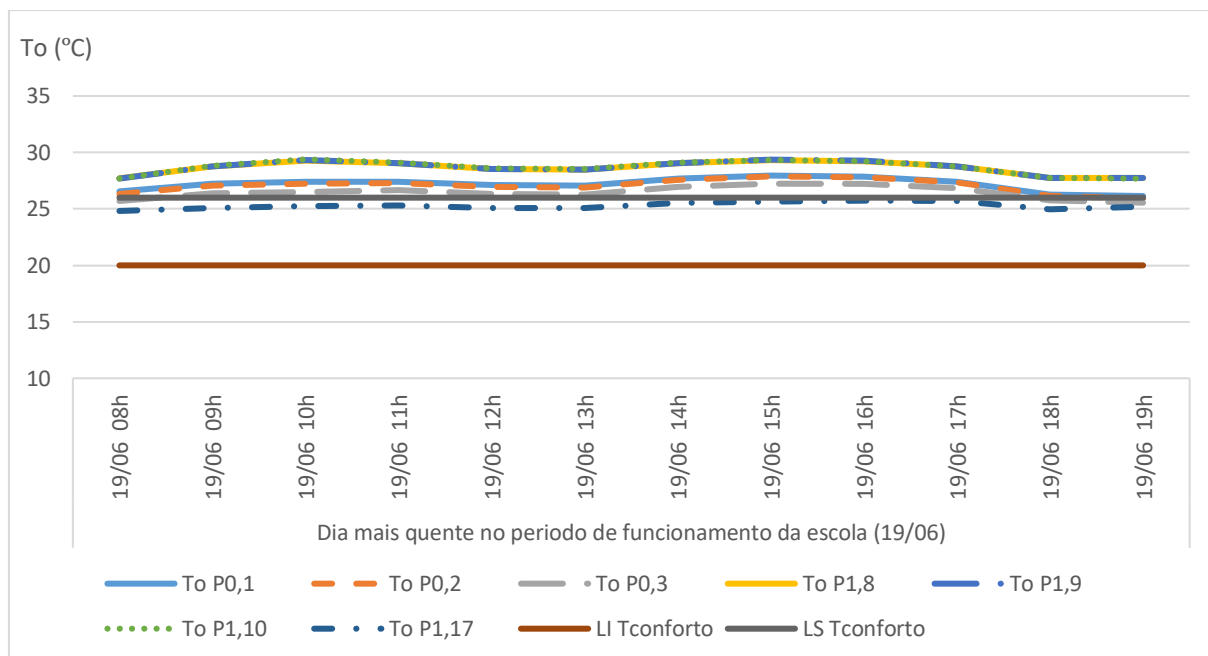


Figura 90 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação

Através da análise do conforto térmico, pelo modelo de conforto térmico adaptativo (ASHRAE 55, 2017), para o dia 19 de junho, dia mais quente do período de ocupação, tendo em consideração que a temperatura exterior média mensal é igual a $17,82^{\circ}\text{C}$ e as temperaturas operativas das salas de aula do piso 1 variam de $27,3^{\circ}\text{C}$ a $27,4^{\circ}\text{C}$, verifica-se, assim, que os ocupantes das salas de aula se encontram em desconforto. A temperatura operativa das salas de aula do piso 0 variam de $25,3^{\circ}\text{C}$ a $26,0^{\circ}\text{C}$ e a da sala de expressão plástica $P_{1,17}$ é de $25,0^{\circ}\text{C}$. Nestas condições os ocupantes das salas de aula do piso 0 e da sala de expressão plástica $P_{1,17}$ encontram-se confortáveis, no limite inferior de conforto (90% aceitabilidade).

Através da análise realizada antes e após a implementação da solução de reabilitação, no dia mais quente (19 de junho), verifica-se que os ocupantes das salas de aulas do piso 1 continuam em desconforto, ou seja, o sistema de isolamento pelo exterior não foi suficiente para que os ocupantes passem a estar numa situação de conforto, e os ocupantes da sala de expressão plástica $P_{1,17}$ continuam numa situação de conforto. Contudo, devido ao efeito do sistema de isolamento térmico contínuo pelo exterior e das

palas de sombreamento, verifica-se que os ocupantes das salas de aulas do piso 0 estavam numa situação de desconforto e passam a estar numa situação de conforto (ver Figura 91).

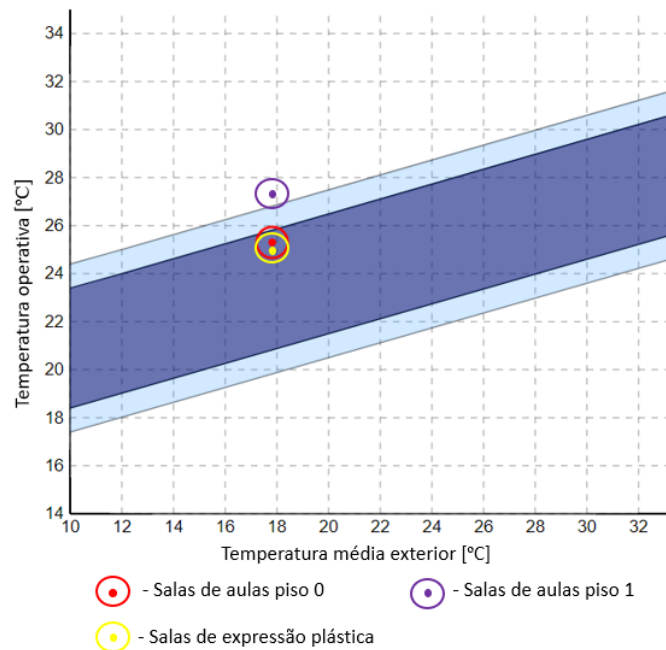


Figura 91 - Modelo de conforto térmico adaptativo, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica P_{1,17}, considerando a situação mais desfavorável (CBE Thermal Comfort Tool, 2019)

4.4. Desempenho termo-energético da solução de reabilitação implementada para o edifício – com sistema AVAC ativo

A análise de desempenho do conforto térmico, com sistema de climatização ativo, é realizada pelo modelo da zona de conforto da ASHRAE 55 (ASHRAE 55, 2017). Para a semana e dia, mais frio e mais quente, com sistema de climatização, foi feita a verificação se a temperatura operativa se encontra ou não no intervalo de conforto (sendo a temperatura mínima no inverno de 20°C e a temperatura máxima no verão de 26°C), pela norma EN 15251, tendo em conta que se trata de um edifício em fase de reabilitação (Categoria II) (EN 15251, 2006).

4.4.1. Desempenho termo-energético da zona do ensino básico – 1º ciclo

4.4.1.1. Desempenho térmico da zona do ensino básico – 1º ciclo

Na semana mais fria, durante o período de ocupação do ensino básico – 1º ciclo, a temperatura interior varia de 13,0°C a 20,0°C. Durante a semana, a temperatura interior vai aumentando a partir das 08:00h, até atingir uma temperatura de 20°C entre as 10:00h e as 11:00h, e até às 19:00h a temperatura interior mantém-se constante nos 20°C, devido à existência de sistema AVAC, em que a temperatura interior mínima, no inverno, é de 20°C e o período de funcionamento deste é entre as 08:00h e as 19:00h, nas salas de aulas do ensino básico – 1º ciclo (ver Figura 92).



Figura 92 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação

Comparando o edifício com a solução de reabilitação implementada com o edifício antes da reabilitação, com sistema AVAC, verifica-se que a temperatura máxima é aproximadamente de 20°C (temperatura mínima no inverno considerada no sistema AVAC) e um aumento da temperatura mínima de 0,3°C, 0,4°C e 0,1°C nas salas de aulas do piso 0, piso 1 e na sala de expressão plástica P_{1,17} respetivamente. Nas salas de aulas do piso 1 existe um maior aumento da temperatura interior em relação às salas de

aulas do piso 0, porque as salas de aulas do piso 0 para além do sistema de isolamento térmico contínuo de 4cm/6cm nas paredes exteriores, foram instaladas palas de sombreamento, diminuindo os ganhos solares (as salas de aulas dos dois pisos estão orientadas a sudeste). A sala de expressão plástica $P_{1,17}$ é a que apresenta menor aumento de temperatura interior, apesar da aplicação de sistema de isolamento térmico contínuo de 4cm/6cm nas paredes exteriores, porque está orientada a noroeste, logo tem menores ganhos.

Durante o período de ocupação, na semana de 21 a 25 de janeiro, a temperatura operativa varia de 13,2°C (às 08:00h) a 20,0°C (às 12:00h). Nas salas de aulas (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, a temperatura operativa é inferior a 20°C, logo não se encontra no intervalo de conforto (ver Figura 93).

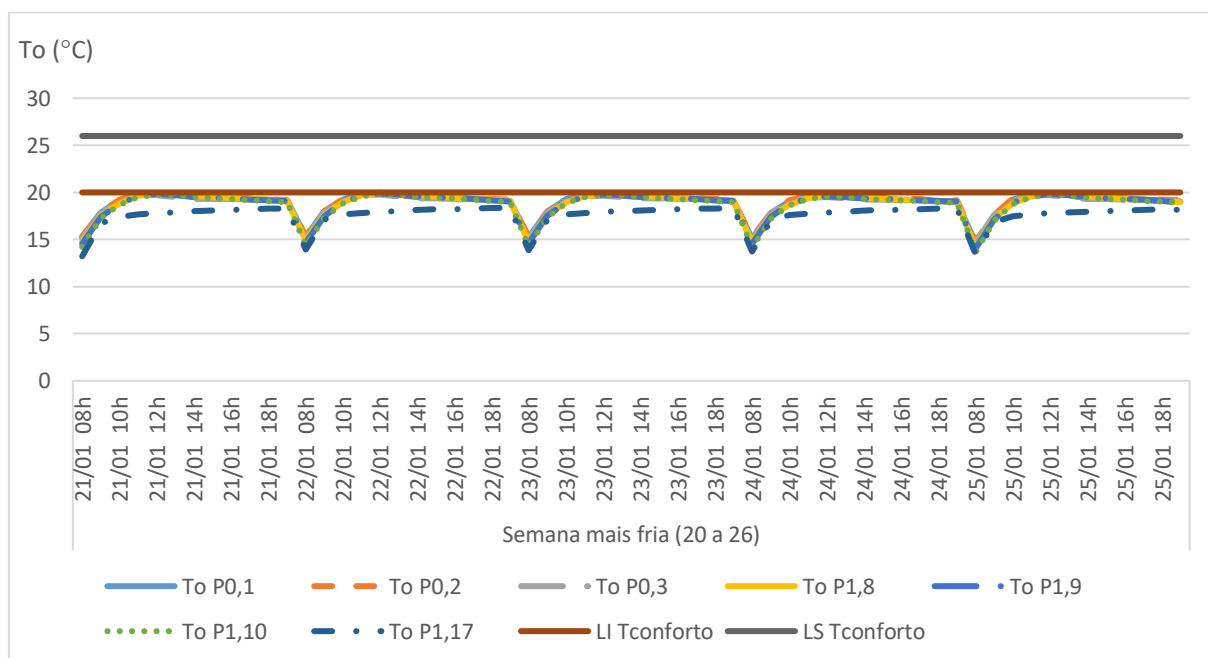


Figura 93 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação

Com a implantação da solução de reabilitação, verifica-se que nas salas de aulas do piso 1 e na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, a temperatura operativa continua fora do intervalo de conforto. Nas salas de aulas do piso 0, a temperatura operativa encontrava-se em conforto, das 11:00h às 12:00h no dia 21, 22, 23 e 25 de janeiro, e passa a não se encontrar no intervalo de conforto, devido à instalação das palas de sombreamento, diminuindo os ganhos solares, apesar da aplicação de sistema de isolamento térmico contínuo de 4cm/6cm nas paredes exteriores, ou seja, as palas têm maior efeito que o sistema de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores, em relação ao edifício antes da reabilitação.

Durante o inverno, no dia mais frio, verifica-se que no período de ocupação do ensino básico – 1º ciclo, a temperatura interior varia de 12,1°C a 20,0°C. As salas de aulas do piso 0 e do piso 1 (orientadas a sudeste), têm temperatura interior superior à sala de aula P_{1,17} (orientada a noroeste), devido aos ganhos solares. As salas de aulas do piso 0 têm uma temperatura interior superior às salas de aulas do piso 1, devido a menores perdas de calor do interior para o exterior da sala de aula. O sistema AVAC, liga às 08:00h em que a temperatura interior vai aumentando gradualmente até que atinge uma temperatura de 20°C pelas 10:00h, na sala de aula (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica P_{1,17}, mantendo as três salas de aulas a uma temperatura constante de 20°C, até às 19:00h, hora em que o sistema é desligado, começando a temperatura interior a diminuir novamente (ver Figura 94).

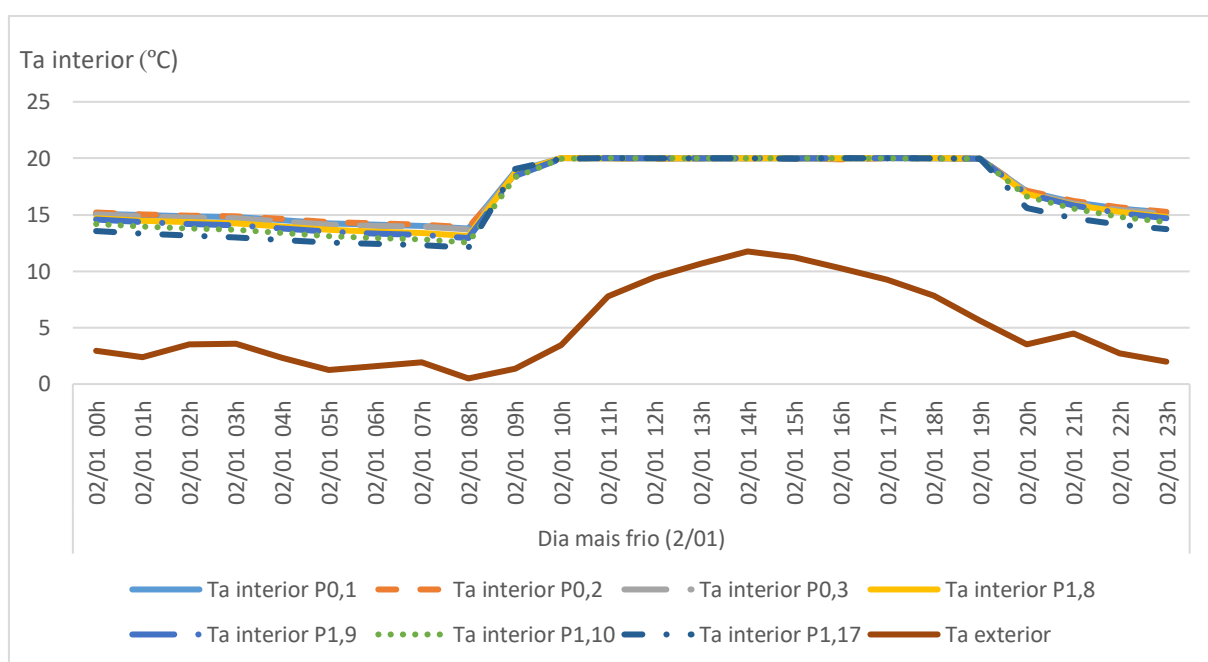


Figura 94 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo
– com reabilitação

Após a implementação da solução de reabilitação, verifica-se um aumento da temperatura interior mínima de 0,3°C, nas salas de aulas do piso 0 e do piso 1, devido à colocação sistema de isolamento térmico contínuo de 4cm/6cm nas paredes exteriores, diminuindo as perdas de calor do interior do espaço para o exterior, e foram instaladas palas de sombreamento nas salas de aulas do piso 0, diminuindo os ganhos solares. Na sala de expressão plástica P_{1,17}, a temperatura interior mínima manteve-se igual, ou seja, à aplicação de sistema de isolamento térmico contínuo de 4cm/6cm nas paredes exteriores, não foi suficiente para aumentar a temperatura interior mínima da sala de aula. A temperatura

interior máxima nas salas de aulas (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, é de 20°C, devido ao sistema AVAC.

No dia 2 de janeiro, durante o período de ocupação do ensino básico – 1º ciclo, a temperatura operativa das salas de aulas (piso 0 e piso 1) e da sala de expressão plástica $P_{1,17}$ não estão no intervalo de conforto, pois a temperatura operativa é inferior a 20°C, contudo a colocação do sistema de isolamento térmico contínuo de 4cm/6cm nas paredes exteriores, nas salas de aulas do piso 1 e na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, fez aumentar a temperatura operativa, aproximando-se do intervalo de conforto (ver Figura 95).

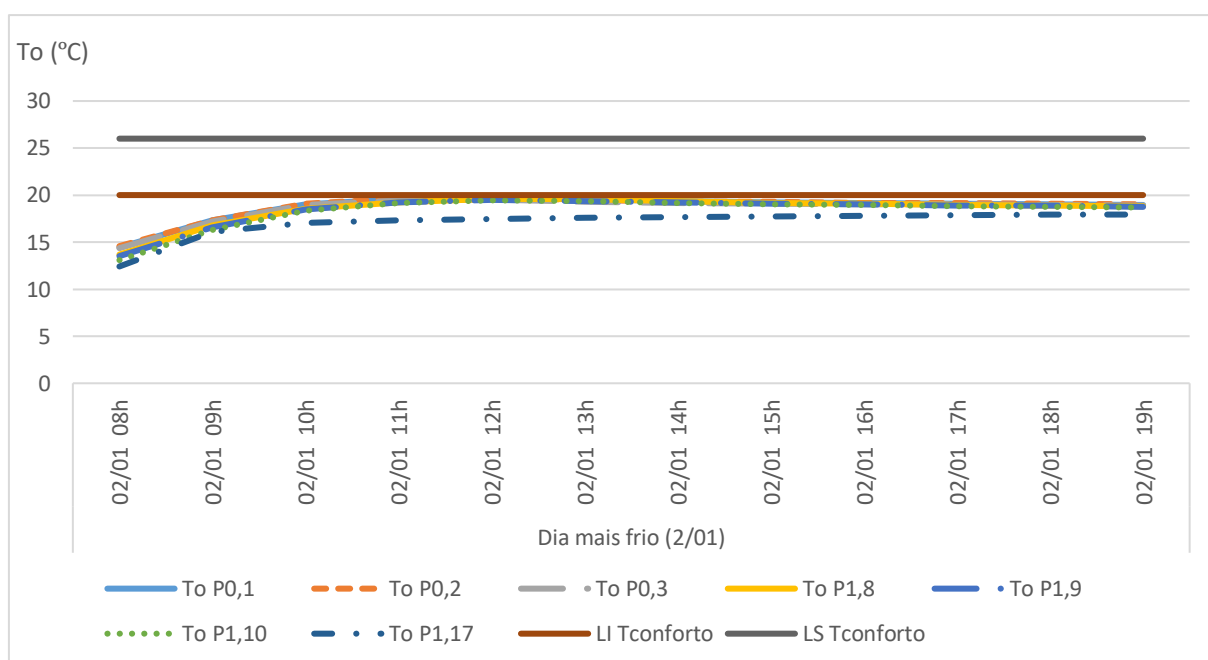


Figura 95 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação

Através da análise do conforto térmico, pelo método da zona de conforto (ASHRAE 55, 2017), para o dia 2 de janeiro no ensino básico – 1º ciclo, as temperaturas operativas das salas de aulas (piso 0 e piso 1) e da sala de expressão plástica $P_{1,17}$, variam de 15,38°C a 17,23°C, tendo em conta que a taxa metabólica dos ocupantes é de 1,2 met, o isolamento do vestuário no inverno de 1,0 clo, a velocidade média do ar inferior a 0,1 m/s e a humidade relativa de 55,80%, verifica-se que os ocupantes das salas de aulas (piso 0 e piso 1) e da sala de aula $P_{1,17}$ estavam em desconforto, e continuam a estar em desconforto, logo a aplicação do isolamento térmico de 4cm/6cm nas paredes exteriores não foi suficiente (ver Figura 96). Para tentar atingir a zona de conforto, uma possível solução será aumentar o isolamento térmico nas paredes exteriores e na cobertura.

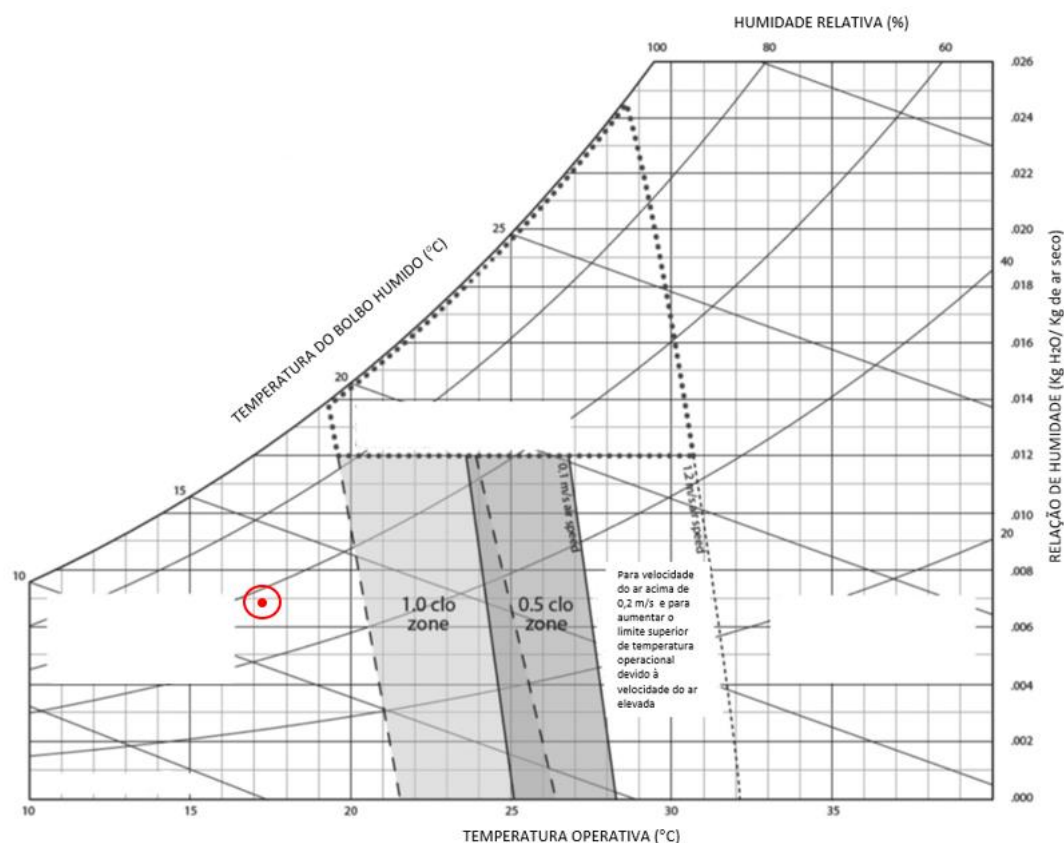


Figura 96 - Método da zona de conforto, para o dia mais frio no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica P_{1,17}, considerando a situação mais desfavorável (ASHRAE 55, 2017)

Na semana de 17 a 21 de junho, a temperatura interior varia de 20,9°C a 26,7°C, no período de ocupação do ensino básico – 1º ciclo. A temperatura interior das salas de aulas do piso 0, varia de 21,6°C a 26,0°C, das salas de aulas do piso 1, varia de 23,4°C a 26,7°C e a sala de expressão plástica P_{1,17}, varia de 20,9°C a 26,0°C. Nas salas de aulas do piso 0, a temperatura interior atinge os 26°C, maioritariamente entre as 14:00h e as 17:00h, devido aos menores ganhos solares. Nas salas de aulas do piso 1, a temperatura interior chega aos 26°C aproximadamente a partir das 9:00h durante a semana, e a temperatura máxima é atingida às 19:00h, visto que o sistema AVAC é ligado às 08:00h e é desligado às 19:00h, como o período do fim das aulas é até às 18:00h, verifica-se que os ocupantes estão em conforto praticamente durante toda a semana, exceto no dia 17 de janeiro, em que a temperatura interior atinge os 26°C apenas das 14:00h às 17:00h. A sala de expressão plástica P_{1,17} (orientada a noroeste) tem menores ganhos através dos envidraçados, paredes e cobertura, atingindo os 26°C apenas das 15:00h às 16:00h no dia 19 e 20 de junho (Figura 97). Com a colocação de sistema de isolamento térmico contínuo de 4cm/6cm nas paredes exteriores, a temperatura interior mantém-se igual, nas salas

de aulas do piso 1 e na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, e a temperatura interior diminui nas salas de aulas do piso 0, devido à instalação de palas de sombreamento, diminuindo os ganhos solares, para além da aplicação de sistema de isolamento térmico contínuo de 4cm/6cm nas paredes exteriores, em relação ao edifício antes da reabilitação.

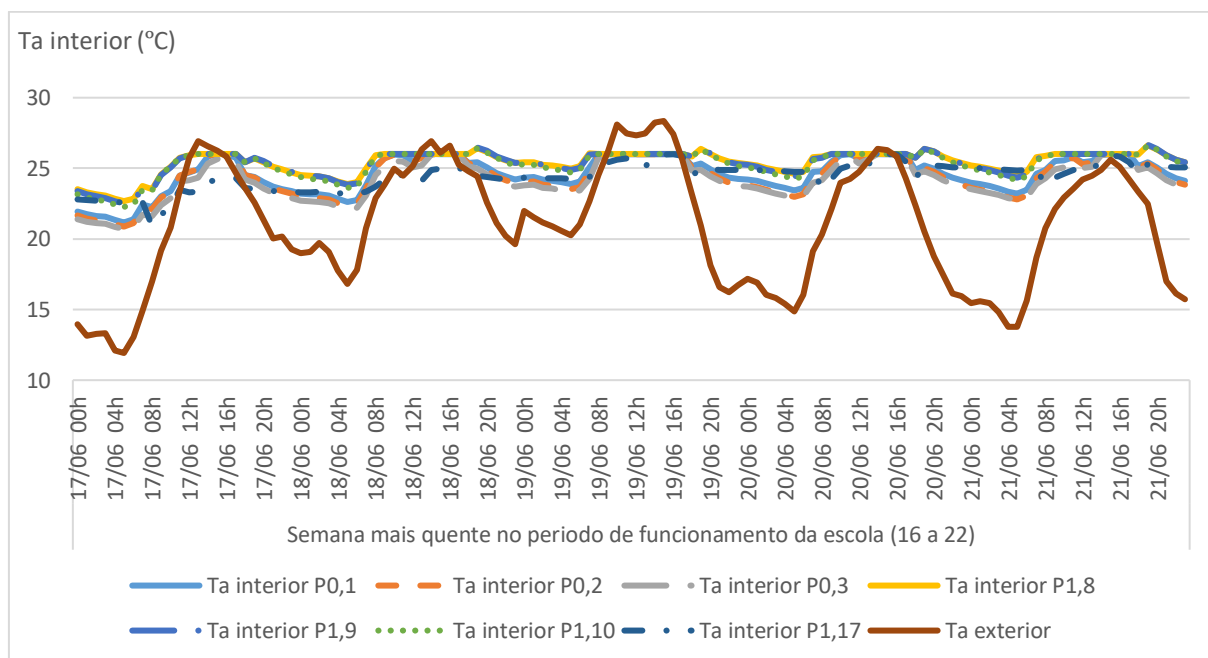


Figura 97 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação

Durante o período de ocupação, na semana mais quente, a temperatura operativa está no intervalo de conforto, no dia 17 e 18 de junho, das 18:00h às 19:00h no dia 19 e 20 de junho e das 08:00h às 12:00h e das 18:00h às 19:00h no dia 21 de junho, na sala de aula $P_{0,1}$, no dia 17 e 18 de junho, das 18:00h às 19:00h no dia 19 de junho e das 08:00h às 12:00h e das 18:00h às 19:00h no dia 20 e 21 de junho, nas sala de aula $P_{0,2}$, no dia 17, 18 e 21 de junho, das 08:00h às 12:00h e das 18:00h às 19:00h no dia 19 de junho e das 08:00h às 12:00h e das 17:00h às 19:00h no dia 20 de junho, na sala de aula $P_{0,3}$. A temperatura operativa nas salas de aulas do piso 1, está no intervalo de conforto, das 08:00h às 10:00h no dia 17 de junho. Na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, a temperatura operativa está durante a semana mais quente, no intervalo de conforto (Figura 98).

Após a implementação da solução de reabilitação, em relação ao edifício antes da reabilitação, verifica-se que a sala de aula $P_{0,1}$, $P_{0,2}$ e $P_{0,3}$, passam a estar no intervalo de conforto 25h, 29h e 37h respetivamente. As salas de aulas do piso 1, continuam no intervalo de conforto, das 08:00h às 10:00h

no dia 17 de junho, e a sala de expressão plástica P_{1,17} também continua no intervalo de conforto, durante a semana.

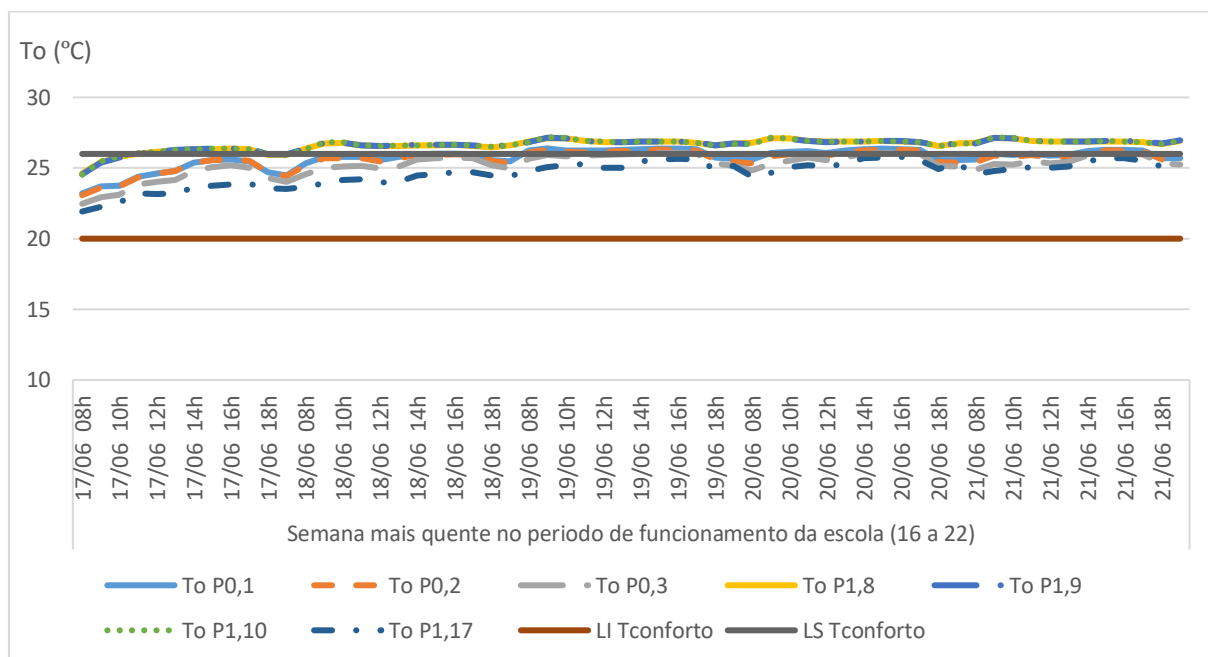


Figura 98 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação

No dia mais quente (19 de junho), durante o período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, a temperatura exterior varia de 20,9°C a 28,4°C, e a temperatura interior varia de 24,5°C a 26,4°C. A temperatura interior das salas de aulas do piso 0, varia de 24,9°C a 26,0°C, das salas de aulas do piso 1, varia de 25,8°C a 26,4°C e a sala de expressão plástica P_{1,17}, varia de 24,5°C a 26,0°C. A temperatura interior atinge os 26°C a partir das 08:00h nas salas de aulas do piso 1, e a partir das 09:00h nas salas de aulas do piso 0, o sistema AVAC é ligado às 08:00h, e a temperatura interior máxima é atingida às 19:00h, devido ao sistema AVAC ser desligado a essa hora, como o período das aulas é das 08:00h às 12:00h e das 14:00h às 18:00h, os ocupantes estão em conforto praticamente durante todo o dia. A sala de expressão plástica P_{1,17} atinge os 26°C apenas entre as 15:00h e as 16:00h, porque tem menores ganhos através dos envidraçados, das paredes e da cobertura (está orientada a noroeste), em relação às salas de aulas (piso 0 e piso 1) que estão orientadas a sudeste (ver Figura 99). Com a aplicação de sistema de isolamento térmico contínuo de 4cm/6cm nas paredes exteriores, nas salas de aulas do piso 1 e na sala de expressão plástica P_{1,17}, e ainda palas de sombreamento nas salas de aulas do piso 0, verifica-se uma redução da temperatura interior máxima, de 0,4°C, nas salas de aulas do piso 1, e de

0,5, nas salas de aulas do piso 0. Na sala de expressão plástica P_{1,17}, a temperatura interior máxima manteve-se nos 26°C.

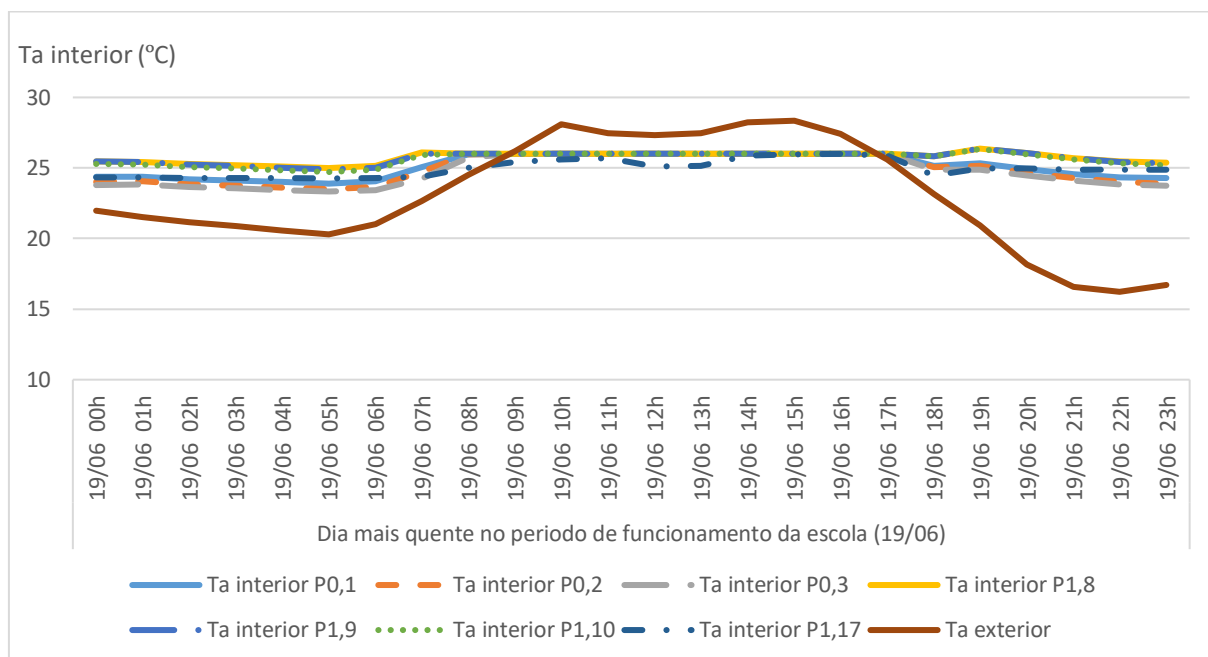


Figura 99 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação

Durante o período de ocupação do ensino básico – 1º ciclo, no dia 19 de junho, a temperatura operativa varia de 24,8°C a 27,2°C. A temperatura operativa está no intervalo de conforto (temperatura operativa entre 20°C e 26°C) na sala de expressão plástica P_{1,17}, durante o dia mais quente, das 18:00h às 19:00h nas salas de aulas P_{0,1} e P_{0,2}, e ainda das 08:00h às 12:00h e das 18:00h às 19:00h na sala de aula P_{0,3}. Nas salas de aulas do piso 1, a temperatura operativa é superior a 26°C, logo não se encontra no intervalo de conforto (Figura 100).

Após a implementação da solução de reabilitação, as salas de aulas P_{0,1} e P_{0,2}, passam a estar em conforto durante 1 hora, e a sala de aula P_{0,3}, passa a estar em conforto durante 5h no dia 19 de junho. A sala de expressão plástica P_{1,17} continua, durante o dia mais quente, no intervalo de conforto. Apesar da temperatura operativa nas salas de aulas do piso 1, continuarem fora do intervalo de conforto, a temperatura operativa das salas de aulas diminuiu, aproximando-se dos 26°C.

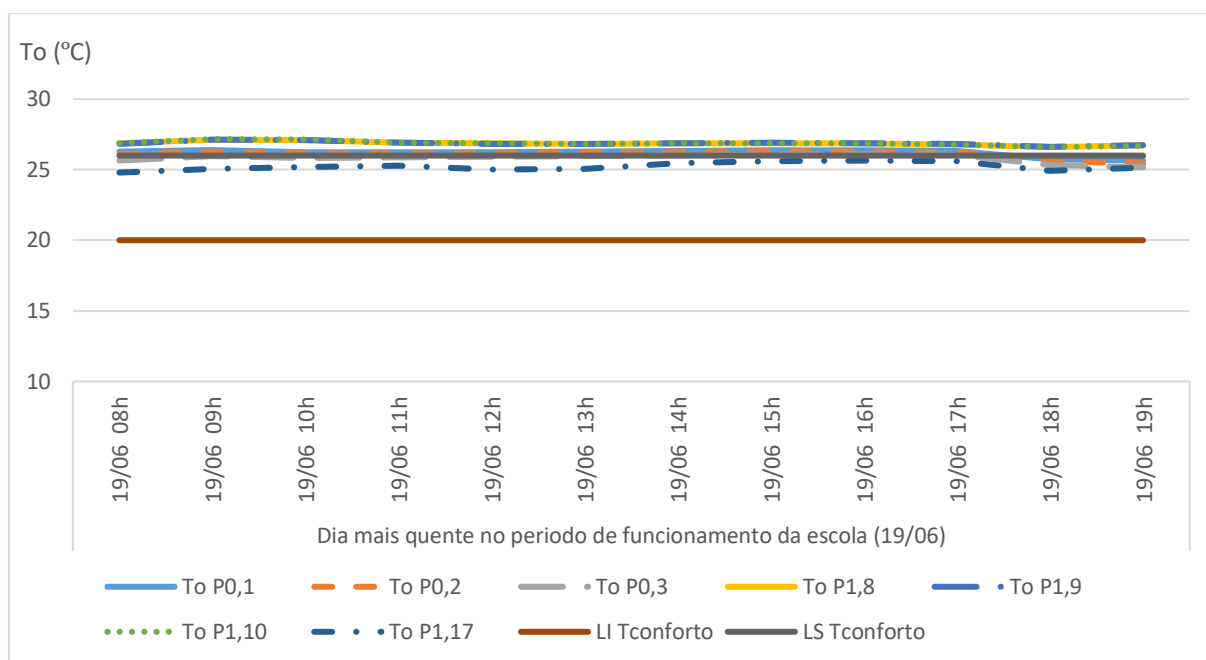


Figura 100 - Temperatura operativa dos espaços para o dia quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação

Através da análise do conforto térmico, pelo método da zona de conforto (ASHRAE 55, 2017), para o dia 19 de junho no ensino básico – 1º ciclo, as temperaturas operativas das salas de aulas do piso 0 e da sala de aula P_{1,10}, variam de 24,93°C a 26,20°C, das salas de aulas P_{1,8} e P_{1,9} são de 26,30°C e 26,28°C respetivamente, e na sala de expressão plástica P_{1,17} é de 24,97°C, tendo em conta que a taxa metabólica dos ocupantes é de 1,2 met, o isolamento do vestuário no inverno de 0,5 clo, a velocidade média do ar inferior a 0,1 m/s e a humidade relativa de 55,80%, verifica-se que os ocupantes das salas de aulas do piso 0, da sala de aula P_{1,10} e da sala de expressão plástica P_{1,17} estão em conforto, ou seja, com a colocação de isolamento térmico de 4cm/6cm nas paredes exteriores e palas de sombreamento nas salas de aulas do piso 0, os ocupantes das salas de aulas P_{0,1}, P_{0,2} e P_{1,10} passam a estar em conforto. Nas salas de aulas P_{1,8} e P_{1,9}, os seus ocupantes continuam em desconforto (ver Figura 101). Apesar dos ocupantes estarem em desconforto, nas salas de aulas P_{1,8} e P_{1,9}, a temperatura operativa está próxima da zona de conforto, logo uma solução possível será aplicar palas de sombreamento e isolamento térmico na cobertura, de forma a reduzir os ganhos solares e os ganhos de calor.

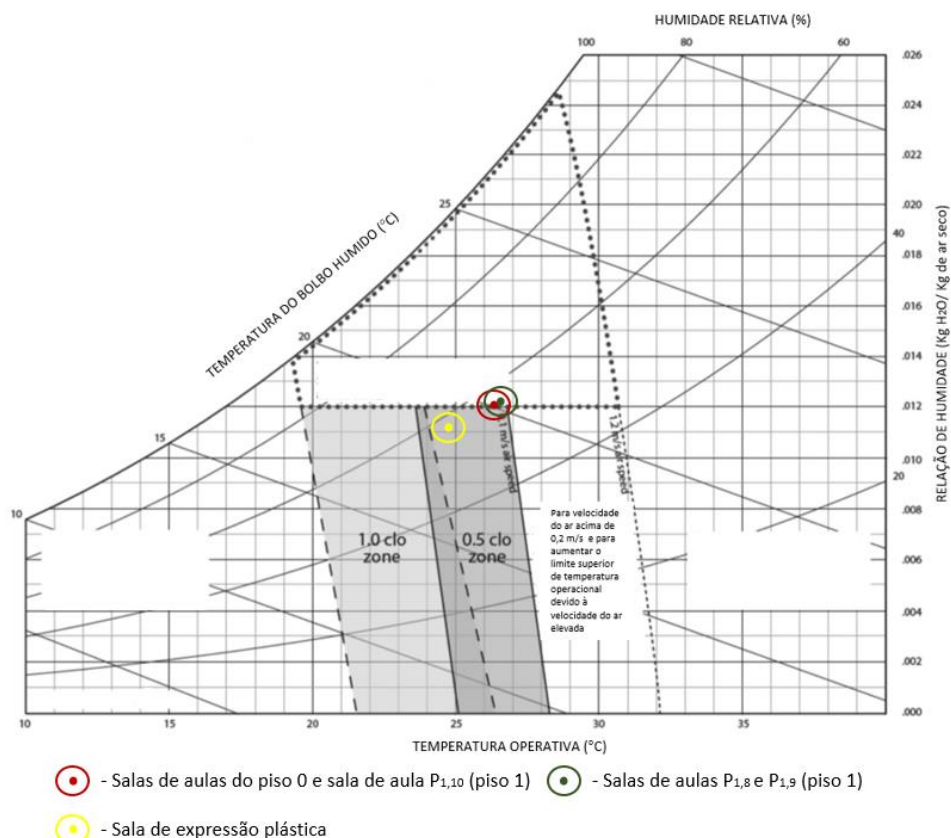


Figura 101 - Método da zona de conforto, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas do piso 0 e sala de aula P_{1,10}, na sala de aula P_{1,8} e P_{1,9}, e na sala de expressão plástica P_{1,17}, considerando a situação mais desfavorável (ASHRAE 55, 2017)

4.4.1.2. Necessidades de aquecimento e arrefecimento da zona do ensino básico – 1º ciclo

As necessidades energéticas da zona do ensino básico – 1º ciclo respetivas ao aquecimento são de 27,4kWh/m².ano, e respetivas ao arrefecimento são de 0,5kWh/m².ano. Os meses com necessidades de aquecimento estão compreendidos entre outubro e maio, sendo o mês de janeiro o mais frio (5,8kWh/m²) e o mês de maio o menos frio (1,4kWh/m²), e os meses com necessidades de arrefecimento são o mês de junho e setembro, sendo o mês de junho o que apresenta maiores necessidades de arrefecimento, com um valor de 0,2kWh/m². Por fim, o mês de julho e agosto não apresentam necessidades de aquecimento, uma vez que a zona do ensino básico – 1º ciclo se encontrar encerrado (ver Figura 102).

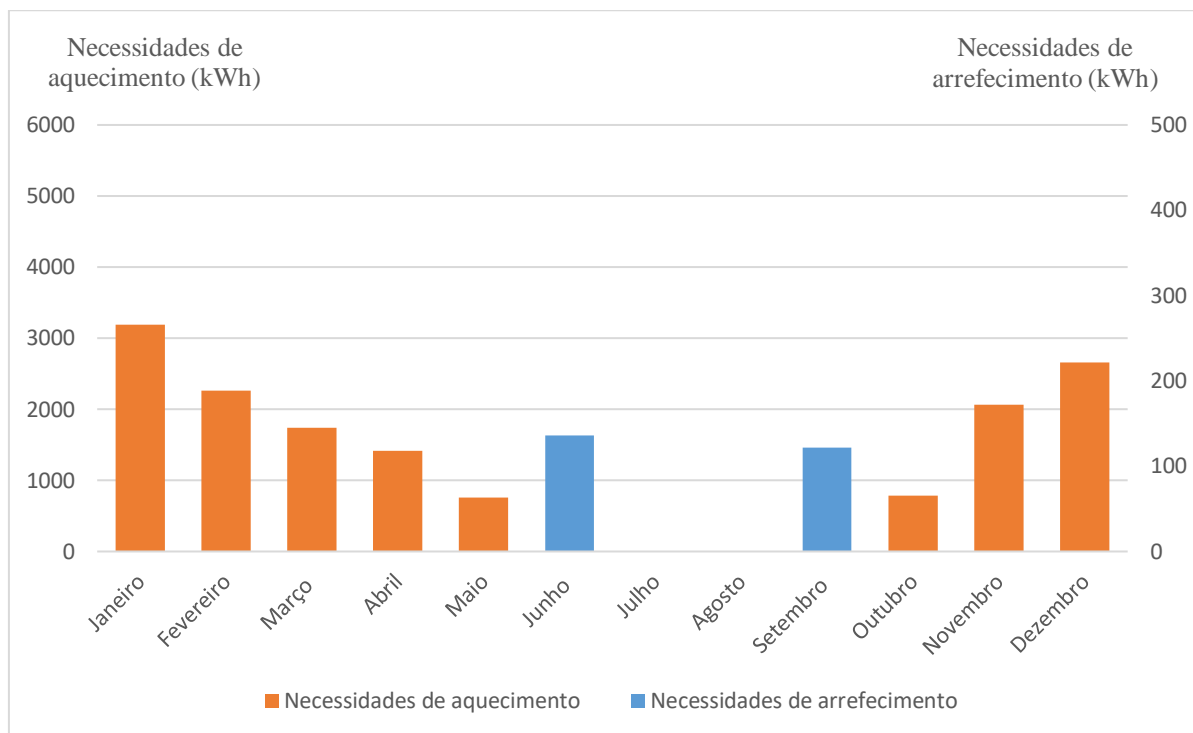


Figura 102 - Necessidades de arrefecimento por mês da zona do ensino básico – 1º ciclo – com reabilitação

As perdas através da envolvente, na zona do ensino básico – 1º ciclo, são de 89,9kWh/m².ano, das quais 46,7% são devidas às perdas através do envidraçados, 24,9% são devidas às perdas através das paredes, 17,6% são devidas às perdas através dos pavimentos e 10,8% são devidas às perdas através da cobertura. Os ganhos solares do edifício são de 71,7kWh/m².ano.

Com a implantação da solução de reabilitação, as necessidades energéticas, da zona do ensino básico – 1º ciclo, de aquecimento reduzem 1,0kWh/m².ano e de arrefecimento reduzem 0,4kWh/m².ano. A zona do ensino básico – 1º ciclo representa 64,6% das necessidades de aquecimento e 50,6% das necessidades de arrefecimento. Anualmente, existe uma redução, de 17,5%, das perdas através da envolvente, devido à colocação de sistema de isolamento térmico de 4m/6cm nas paredes exteriores. E uma redução dos ganhos solares de 16,1%, devido à colocação de palas de sombreamento.

4.4.2. Necessidade de aquecimento e arrefecimento do edifício

O consumo de energia para suprir as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento do edifício são de 29,8kWh/m².ano e de 0,6kWh/m².ano respetivamente, um valor total de 30,4kWh/m².ano. A zona do ensino básico – 1º ciclo representa 64,6% das necessidades de aquecimento

e 50,6% das necessidades de arrefecimento. O mês de janeiro é o mais frio, logo é o que tem maior necessidades de aquecimento, com um valor de 6,3kWh/m², e o mês de setembro é o mais quente do período de ocupação, logo tem maior necessidades de arrefecimento, com um valor de 0,3kWh/m². O mês de agosto não apresenta necessidades de arrefecimento, pois a zona do jardim de infância e a zona do ensino básico – 1º ciclo estão encerradas neste mês (ver Figura 103).

As perdas através da envolvente do edifício são de 75,3kWh/m².ano, das quais 55,1% são devidas às perdas através do envidraçados, 18,3% são devidas às perdas através das paredes, 18,0% são devidas às perdas através dos pavimentos e 8,6% são devidas às perdas através da cobertura. Os ganhos solares do edifício são de 73,1kWh/m².ano.

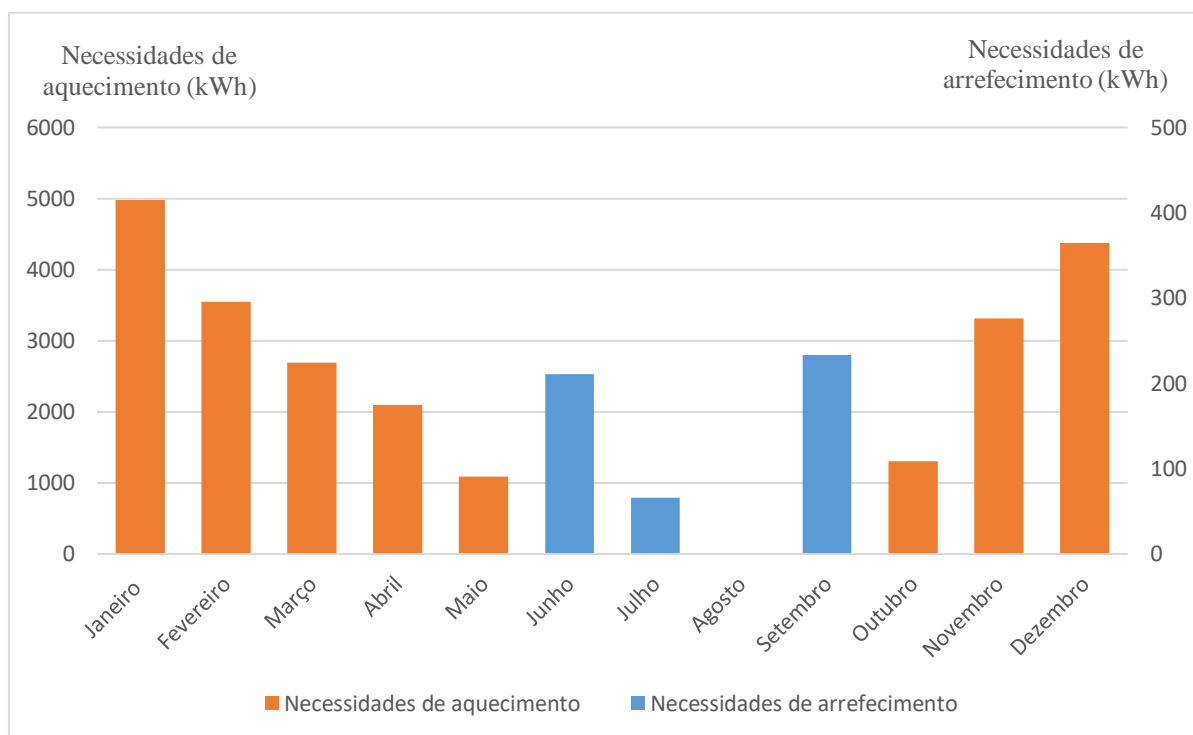


Figura 103 - Necessidade de arrefecimento por mês do edifício – com reabilitação

As necessidades energéticas totais do edifício, após a implementação da solução de reabilitação, reduzem 1,7kWh/m².ano (1,1Wh/m².ano para aquecimento e 0,6Wh/m².ano para arrefecimento). As necessidades do edifício diminuem 5,2% (3,7% das necessidades de aquecimento e 43,6% das necessidades de arrefecimento). As necessidades energéticas de aquecimento diminuiram 5,2% e as necessidades de arrefecimento diminuiram 53,1%, na zona do ensino básico – 1º ciclo. Durante o ano, existe uma redução, de 36,7%, das perdas através da envolvente, devido à colocação de sistema de

isolamento térmico de 4m/6cm nas paredes exteriores. E uma redução dos ganhos solares de 30,2%, devido à instalação de palas de sombreamento, em relação ao edifício antes da reabilitação.

4.5. Desempenho térmico do edifício com a implementação da solução de reabilitação nZEB – sem sistema AVAC ativo

A solução proposta para melhorar o conforto termo-energético do edifício, atingindo assim um nível de edifício nZEB, consistiu na aplicação de um sistema ETICS com 8 cm de isolamento em toda a envolvente da zona do ensino básico – 1º ciclo, um aumento do sistema de isolamento, para 8cm, de toda a envolvente do jardim de infância, um aumento para 15cm de isolamento térmico na cobertura plana do edifício do jardim de infância, e um aumento para 16cm de isolamento térmico na cobertura inclinada do edifício do ensino básico – 1º, e a instalação de seis palas de sombreamento nas salas de aulas, orientadas a sudeste, do piso 0 e do piso 1 do edifício do 1º ciclo. A análise de desempenho do conforto térmico, sem sistema de climatização ativo, é realizada pelo modelo de conforto térmico adaptativo da ASHRAE 55 (ASHRAE 55, 2017). Para a semana e dia, mais frio e mais quente, sem sistema de climatização, foi feita a verificação se a temperatura operativa se encontra ou não no intervalo de conforto (sendo a temperatura mínima no inverno de 20°C e a temperatura máxima no verão de 26°C), pela norma EN 15251, tendo em conta que se trata de um edifício em fase de reabilitação (Categoria II) (EN 15251, 2006).

A análise do conforto térmico, na zona do ensino básico – 1º ciclo, foi realizada apenas para a sala de aula P_{1,10}, localizada na extremidade esquerda do piso 1, para a sala de aula P_{0,2}, localizada no centro das salas de aula do piso 0, e para a sala de expressão plástica P_{1,17}, uma vez que após as análises realizadas anteriormente se verificou que as salas de aulas quer do piso 0 quer do piso 1, apresentam valores de temperaturas próximos.

4.5.1. Desempenho térmico da zona do jardim de infância

Na semana mais fria, de 21 a 25 janeiro, a temperatura interior durante o período de ocupação, varia de 10,7°C (às 08:00h) a 21,9°C (às 15:00h). As salas de aulas J_{0,1} e J_{0,2} têm um valor máximo de temperatura ambiente interior de 21,9°C, e a sala de aula J_{0,3} tem um valor máximo de temperatura interior de 17,3°C (ver Figura 104), uma vez que tem menores ganhos solares (está orientada a norte) enquanto que as salas de aulas J_{0,1} e J_{0,2} estão orientadas a sul. Após a implementação da solução de

reabilitação nZEB, em relação ao edifício antes da reabilitação, verifica-se que com o aumento do isolamento térmico, existe um aumento da temperatura ambiente interior de $0,3^{\circ}\text{C}$, nas salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ e um aumento de $0,6^{\circ}\text{C}$, na sala de aula $J_{0,3}$, devido a uma redução anual, de 20,6%, das perdas através da envolvente opaca.

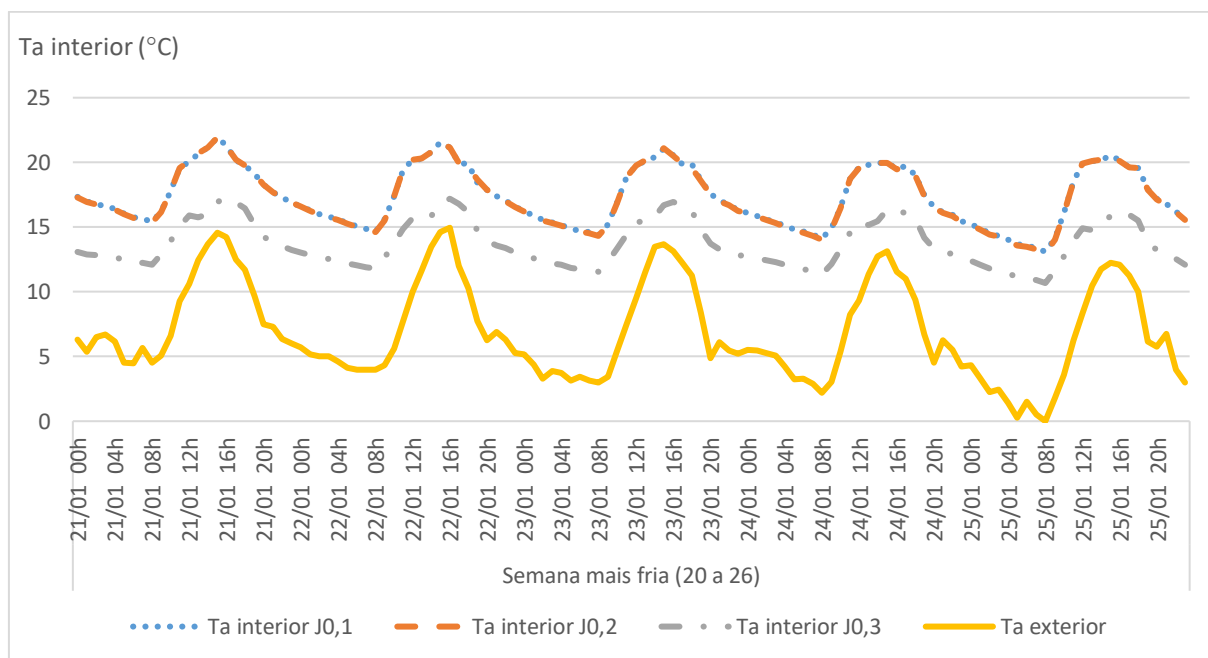


Figura 104 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais fria no jardim de infância – solução nZEB

A temperatura operativa, durante o período de ocupação, varia de $11,3^{\circ}\text{C}$ a $23,2^{\circ}\text{C}$. A temperatura operativa é superior a 20°C e inferior a 26°C , das 14:00h às 18:00h no dia 21, 22, 23 e 25 de janeiro e das 14:00 às 16:00h no dia 24 de janeiro nas salas de aula $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$. Na sala de expressão plástica as temperaturas operativas são inferiores a 20°C (Figura 105). Os ocupantes das salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$, no dia 22, 23 e 25 de janeiro, passaram a estar mais 1 hora em conforto por dia, devido ao efeito da solução de reabilitação nZEB e na sala de aula $J_{0,3}$ existe um aumento da temperatura operativa, contudo não há alteração do número de horas de conforto, em relação ao edifício antes da reabilitação.

Durante o inverno, no dia mais frio, verifica-se que no período de ocupação do jardim de infância, os espaços com temperatura ambiente interior mais elevada são a sala de aula $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$, que varia de $13,0^{\circ}\text{C}$ a $20,3^{\circ}\text{C}$, devido às suas cargas internas (ocupação, iluminação e equipamentos) e aos ganhos solares (encontram-se orientadas a sul), enquanto que a sala de aula $J_{0,3}$ apresenta uma temperatura ambiente interior inferior (encontra-se orientada a norte), que varia de $10,0^{\circ}\text{C}$ a $14,9^{\circ}\text{C}$ (ver Figura 106). Com a implementação da solução de reabilitação nZEB, existe um aumento da temperatura ambiente interior

nas três salas de aulas, nas salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ um aumento de $0,1^{\circ}\text{C}$ e $0,3^{\circ}\text{C}$ e na sala de aula $J_{0,3}$ um aumento de $1,4^{\circ}\text{C}$ respetivamente para a temperatura máxima (no período de ocupação), em relação ao edifício antes da reabilitação.

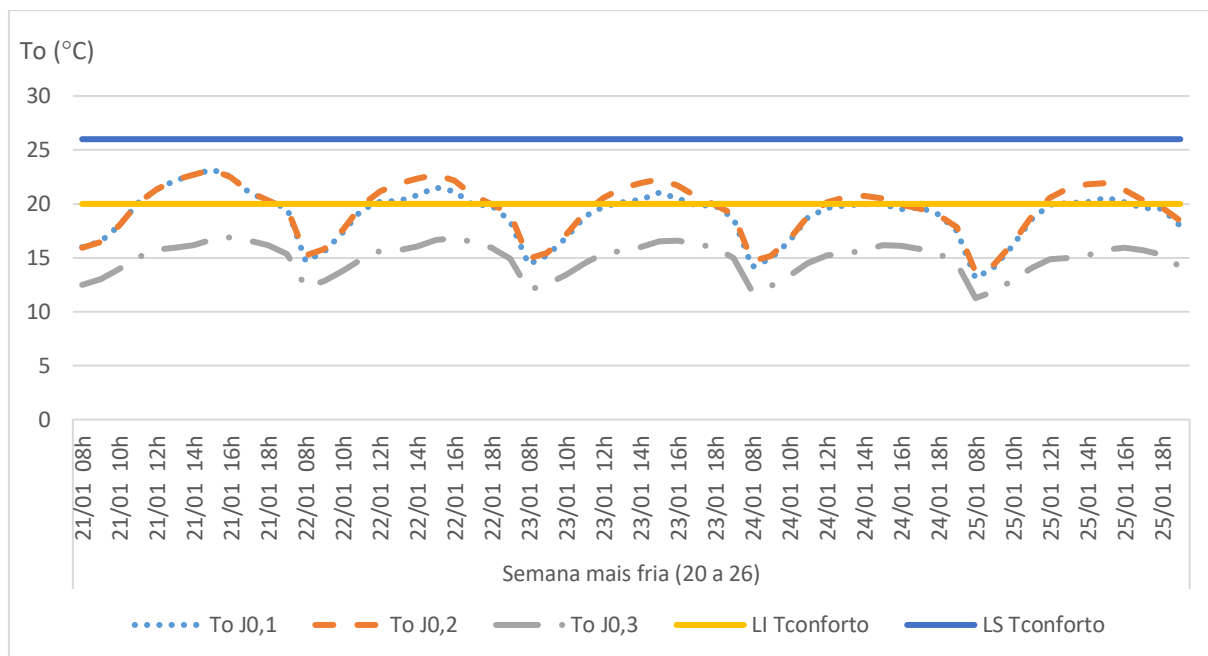


Figura 105 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais fria no jardim de infância – solução nZEB

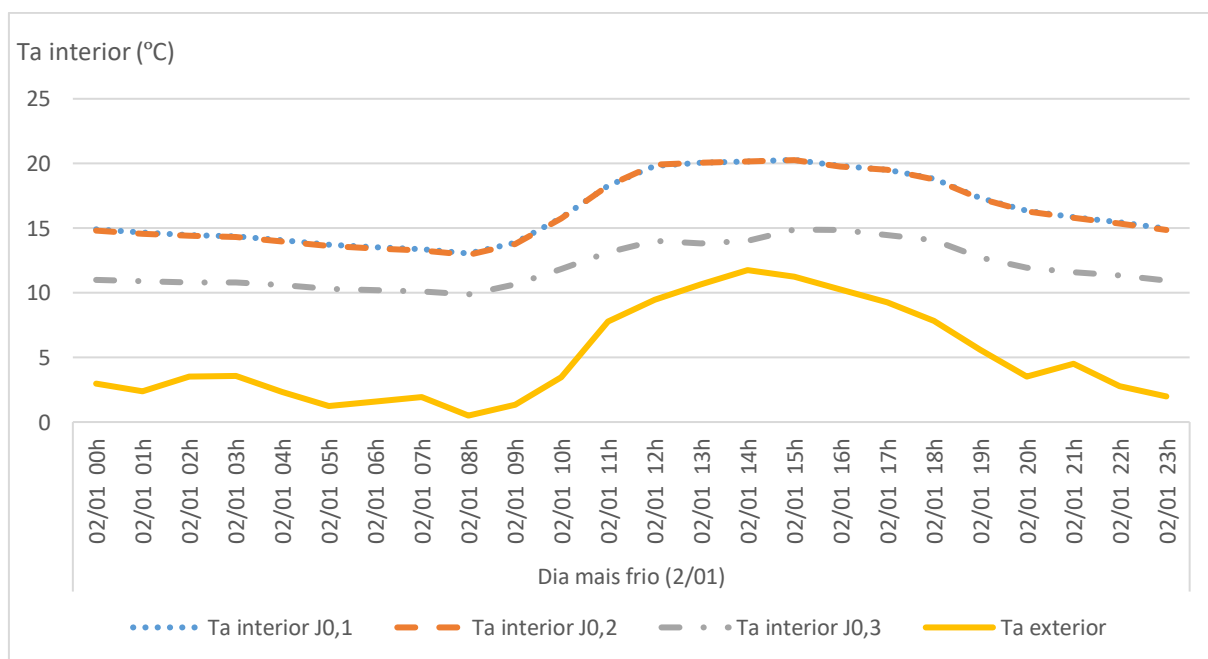


Figura 106 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais frio no jardim de infância – solução nZEB

No dia 2 de janeiro, durante o período de ocupação, os ocupantes das salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$, das 14:00h às 17:00h estão no intervalo de conforto e na sala de aula $J_{0,3}$, os ocupantes não estão no intervalo de conforto (ver Figura 107). Existe um aumento da temperatura operativa de $0,5^{\circ}\text{C}$, nas salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ e de $1,4^{\circ}\text{C}$ na sala de aula $J_{0,3}$, no entanto apenas os ocupantes das salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$, passam a estar mais 1 hora em situação de conforto, devido ao aumento do nível de isolamento da envolvente, em relação ao edifício antes da reabilitação.

Como o valor da temperatura exterior média mensal é inferior a $9,4^{\circ}\text{C}$, no dia mais frio, não foi feita a análise do conforto térmico.

Na semana mais quente do período de ocupação do jardim de infância (de 17 a 21 de junho), a temperatura exterior varia de $17,0^{\circ}\text{C}$ (às 08:00h) a $28,4^{\circ}\text{C}$ (às 15:00h), e a temperatura interior varia de $20,9^{\circ}\text{C}$ (às 08:00h) a $30,2^{\circ}\text{C}$ (às 15:00h). As salas de aulas $J_{0,1}$, $J_{0,2}$ e $J_{0,3}$ têm valores próximos de temperatura interior, que variam de $20,9^{\circ}\text{C}$ a $29,9^{\circ}\text{C}$, de $21,2^{\circ}\text{C}$ a $30,2^{\circ}\text{C}$ e de $21,2^{\circ}\text{C}$ a $29,2^{\circ}\text{C}$ respetivamente (ver Figura 108). A temperatura interior das salas de aulas $J_{0,1}$, $J_{0,2}$ e $J_{0,3}$ diminuiu, aproximadamente $0,6^{\circ}\text{C}$, devido ao aumento de isolamento térmico nas paredes exteriores e na cobertura plana (existe uma redução anual, de 19%, devida às perdas térmicas através da envolvente opaca).

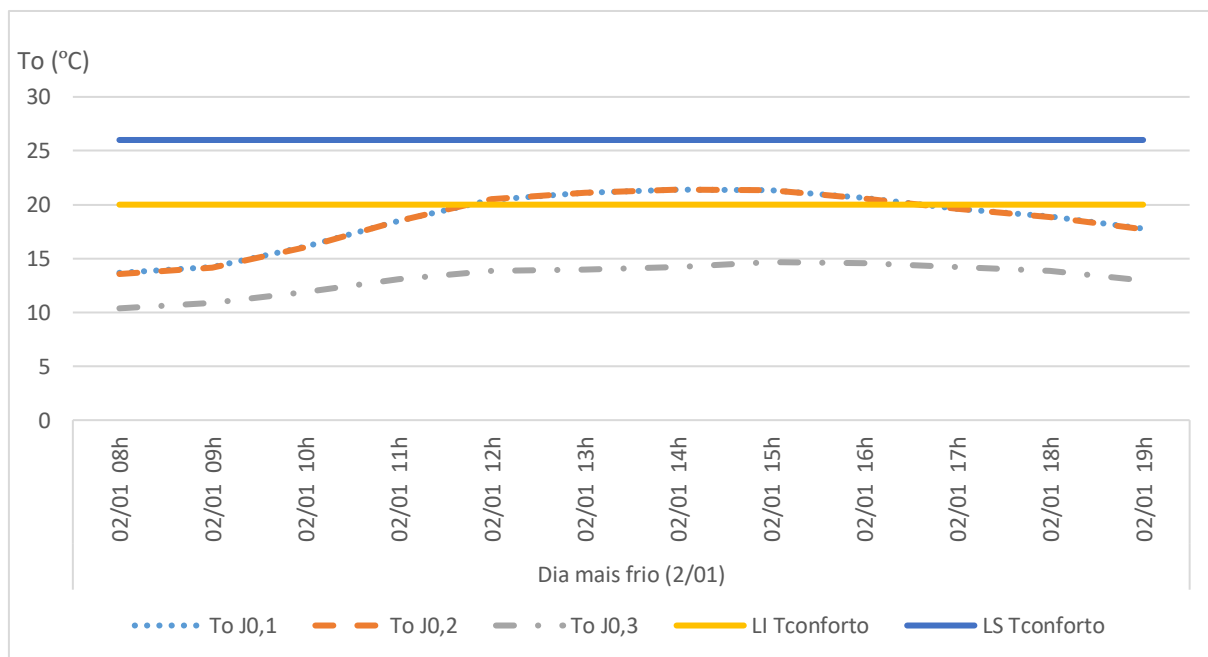


Figura 107 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais frio no jardim de infância – solução nZEB

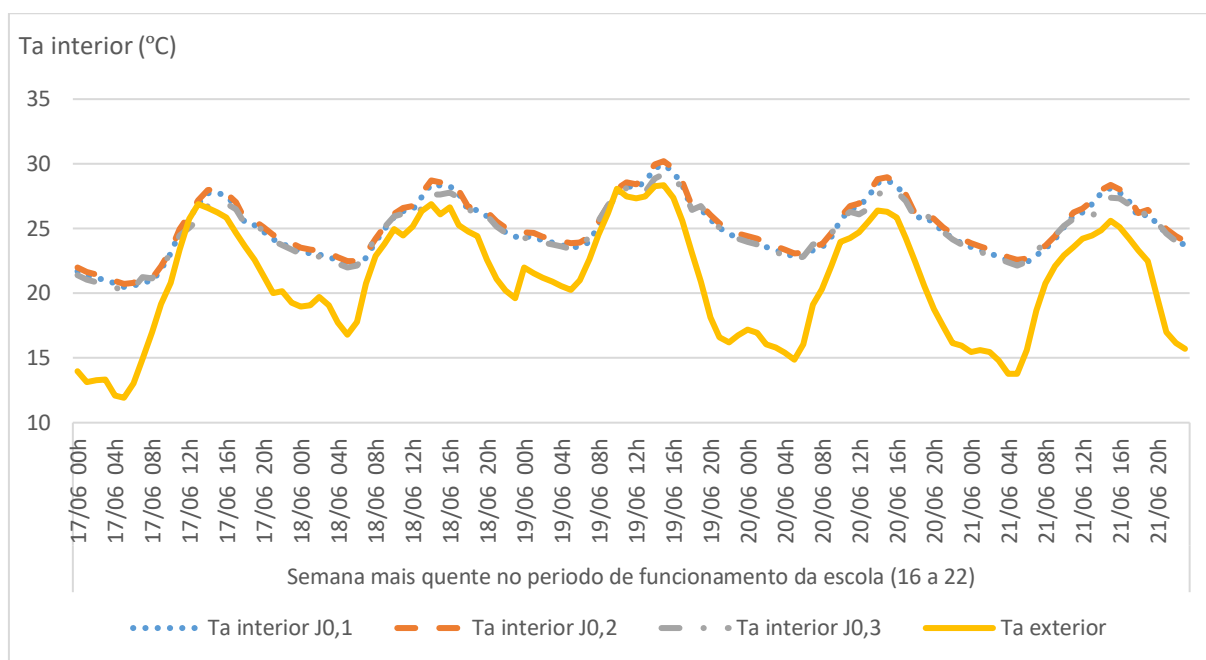


Figura 108 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – solução nZEB

Durante o período de ocupação do jardim de infância, os ocupantes estão no intervalo de conforto no dia 17 de junho das 08:00h às 12:00h, no dia 19 de junho das 08:00h às 09:00h e no dia 20 de junho das 08:00h às 10:00h nas três salas de aulas. Também se encontram no intervalo de conforto, na sala de aula J_{0,1}, das 18:00h às 19:00h no dia 17 de junho, das 00:08h às 11:00h no dia 18 de junho e das 00:08h às 11:00h no dia 21 de junho, na sala de aula J_{0,2}, das 18:00h às 19:00h no dia 17 de junho, das 00:08h às 10:00h no dia 18 de junho e das 08:00h às 10:00h no dia 21 de junho, e na sala de aula J_{0,3}, das 17:00h às 19:00h no dia 17 de junho, das 00:08h às 11:00h no dia 18 de junho e das 08:00h às 12:00h no dia 21 de junho (ver Figura 109). A implementação da solução de reabilitação nZEB, aumentou as horas de conforto dos utilizadores das três salas de aulas, existindo um aumento de 8 horas no dia 17 de junho, de 5 horas no dia 18 de junho, de 3 horas no dia 19 de junho, e por fim de 4 horas nos dias 20 e 21 de junho, em relação ao edifício antes da reabilitação.

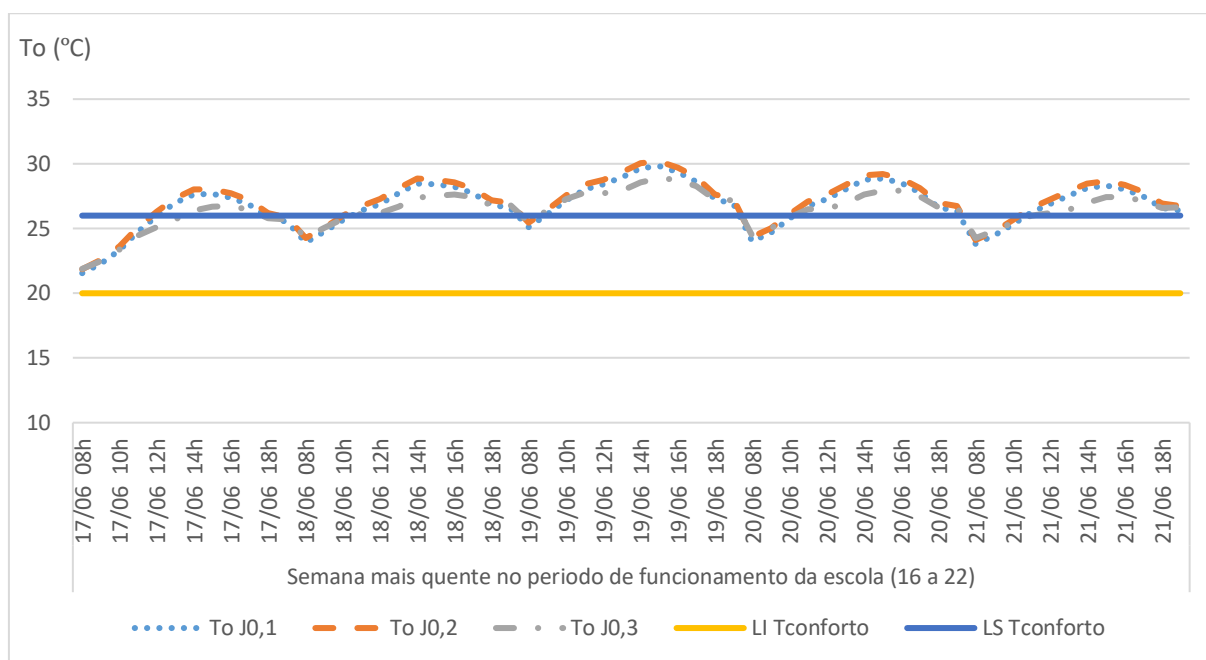


Figura 109 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – solução nZEB

No dia 6 de junho do período de ocupação do jardim de infância, a temperatura ambiente exterior varia de 25,0°C a 31,5°C, e a temperatura ambiente interior varia de 23,8°C a 29,5°C. As salas de aula $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ atingem maior valor de temperatura interior, de 29,1°C e 29,5°C respetivamente, às 15:00h, e a sala de aula $J_{0,3}$ atinge o maior valor de temperatura interior, de 28,1°C, às 19:00h (ver Figura 110). As temperaturas interiores das três salas de aulas são relativamente próximas, pois a sala de aula $J_{0,3}$ está orientada a norte e as salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ estão orientadas a sul, mas estas duas últimas salas têm palas de sombreamento, controlando os ganhos de calor desfavoráveis, com o aumento de isolamento térmico nas paredes exteriores e na cobertura plana, verifica-se que existe uma diminuição da temperatura ambiente interior, de aproximadamente 0,5°C na sala de aula $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ e de 0,7°C na sala de aula $J_{0,3}$, onde existe uma menor diminuição da temperatura interior nas salas de aulas orientadas a sul ($J_{0,1}$ e $J_{0,2}$), em relação ao edifício antes da reabilitação.

Os ocupantes do jardim de infância, durante o dia mais quente, das 08:00h às 10:00h nas salas de aulas $J_{0,1}$, $J_{0,2}$ e $J_{0,3}$, estão dentro do intervalo de conforto, nas restantes horas do dia estão fora do intervalo de conforto, pois a temperatura operativa é superior a 26°C (ver Figura 111). Com a implementação da solução de reabilitação nZEB, os ocupantes da sala de aula $J_{0,2}$ passam a estar em conforto mais 1 hora durante o dia 6 de julho, em relação ao edifício antes da reabilitação.



Figura 110 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – solução nZEB

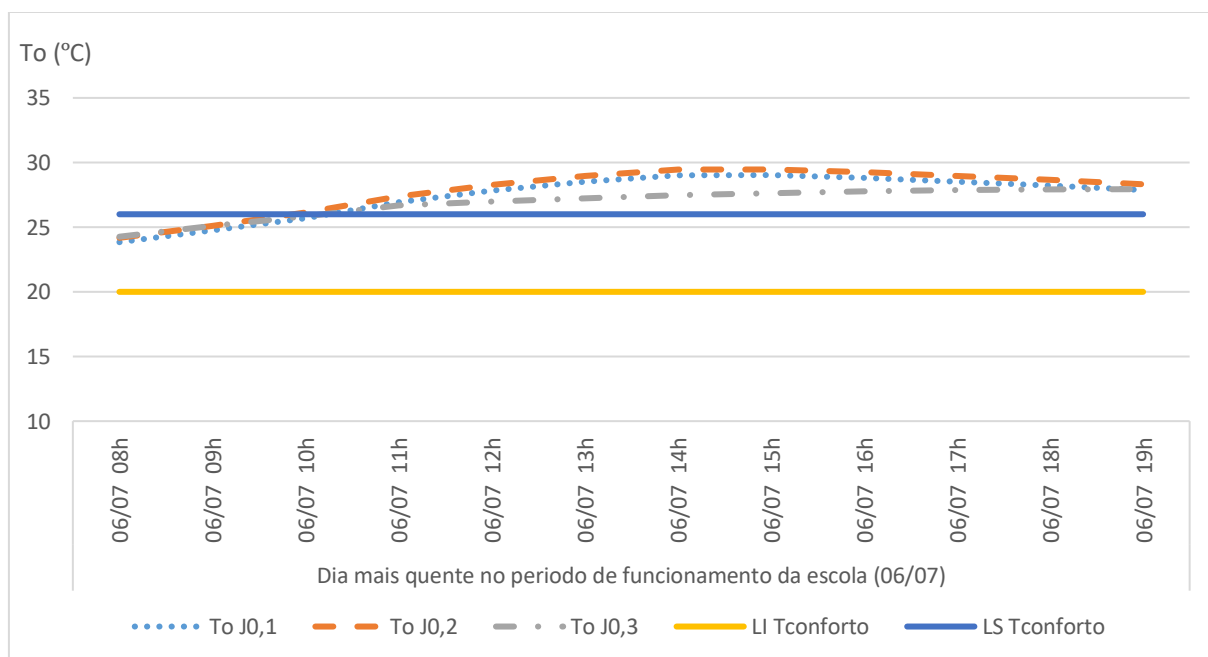


Figura 111 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – solução nZEB

Através da análise da situação de conforto térmico, pelo modelo de conforto térmico adaptativo (ASHRAE 55, 2017), para o dia 6 de julho, dia mais quente, verifica-se que os ocupantes de todas as salas de aulas se encontram em conforto, pois a temperatura operativa varia de 25,54°C a 26,22°C e a

temperatura exterior média mensal é de 18,99°C (ver Figura 112). Comparando o edifício antes da reabilitação, com a implementação da solução de reabilitação nZEB, verifica-se que os ocupantes das salas de aulas do jardim de infância continuam numa situação de conforto.

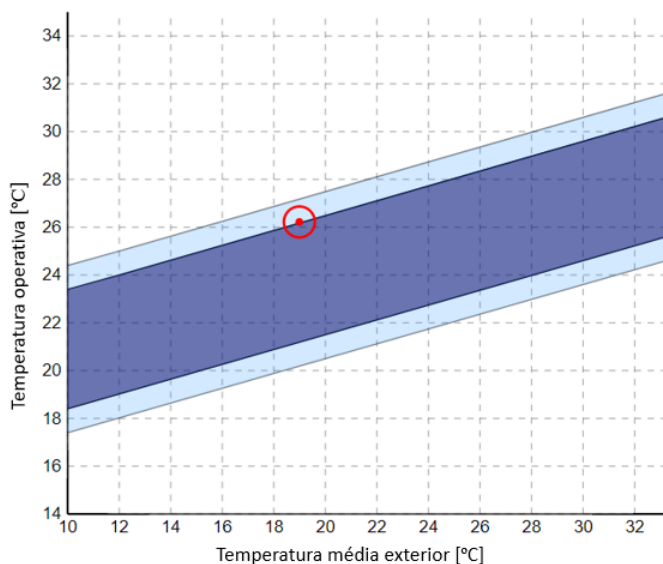


Figura 112 - Modelo de conforto térmico adaptativo, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do jardim de infância, nas salas de aulas, considerando a situação mais desfavorável (CBE Thermal Confort Tool, 2019)

4.5.2. Desempenho térmico da zona do ensino básico – 1º ciclo

Na semana mais fria, de 21 a 25 de janeiro, a temperatura ambiente exterior varia de 0°C a 15,0°C, e a temperatura ambiente interior varia de 11,0°C a 19,1°C, no período de ocupação. As salas de aula $P_{0,2}$ e $P_{1,10}$ têm a mesma carga interna, a mesma área de envidraçados, isolamento térmico de 8cm nas paredes exteriores, possuem uma pala de sombreamento e estão orientadas a sudeste, mas a sala de aula $P_{1,10}$ tem uma temperatura máxima interior, de 17,2°C, inferior à sala de aula $P_{0,2}$, de 19,1°C, pois tem maior área de parede exterior, logo maiores perdas de calor.

A temperatura máxima interior da sala de expressão plástica $P_{1,17}$ é de 13,8°C, inferior às das salas de aulas anteriores, pois não tem ganhos solares (orientada a noroeste) (ver Figura 113).

Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, em relação ao edifício sem qualquer intervenção de melhoria, verifica-se um aumento da temperatura máxima interior de 0,4°C na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, devido à colocação de isolamento térmico nas paredes exteriores e ao aumento do

isolamento térmico na cobertura, e existe uma diminuição da temperatura máxima interior, de $0,8^{\circ}\text{C}$, na sala de aula $P_{0,2}$, e de $0,7^{\circ}\text{C}$ na sala e aula $P_{1,10}$, devido ao efeito das palas de sombreamento, cuja redução de ganhos se sobrepõem ao do isolamento térmico das paredes exteriores e da cobertura. Verifica-se uma redução anual, de 41,4%, nas perdas através da envolvente e de 34,7%, nos ganhos solares.

Comparando também em relação ao edifício com a implementação da solução de reabilitação proposta, verifica-se que o aplicação do sistema do isolamento térmico contínuo pelo exterior, de 8cm, não teve influência na temperatura interior da sala de aula $P_{0,2}$. No piso 1, a temperatura interior aumentou, $0,1^{\circ}\text{C}$, na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, devido à aplicação de sistema de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores, de 8cm, e ao aumento do isolamento térmico na cobertura, de 16cm, diminuindo as perdas de calor, e diminuiu $1,2^{\circ}\text{C}$, na sala de aula $P_{1,10}$, pois tem maior área de parede exterior, apesar de ter isolamento térmico nas paredes, de 8cm, e na cobertura, de 16cm, existem maiores perdas de calor, e tem uma pala de sombreamento, diminuindo assim os ganhos solares. Anualmente, verifica-se também uma redução, de 19,0%, devido à redução das perdas através da envolvente e de 16,0%, devido à redução dos ganhos solares.

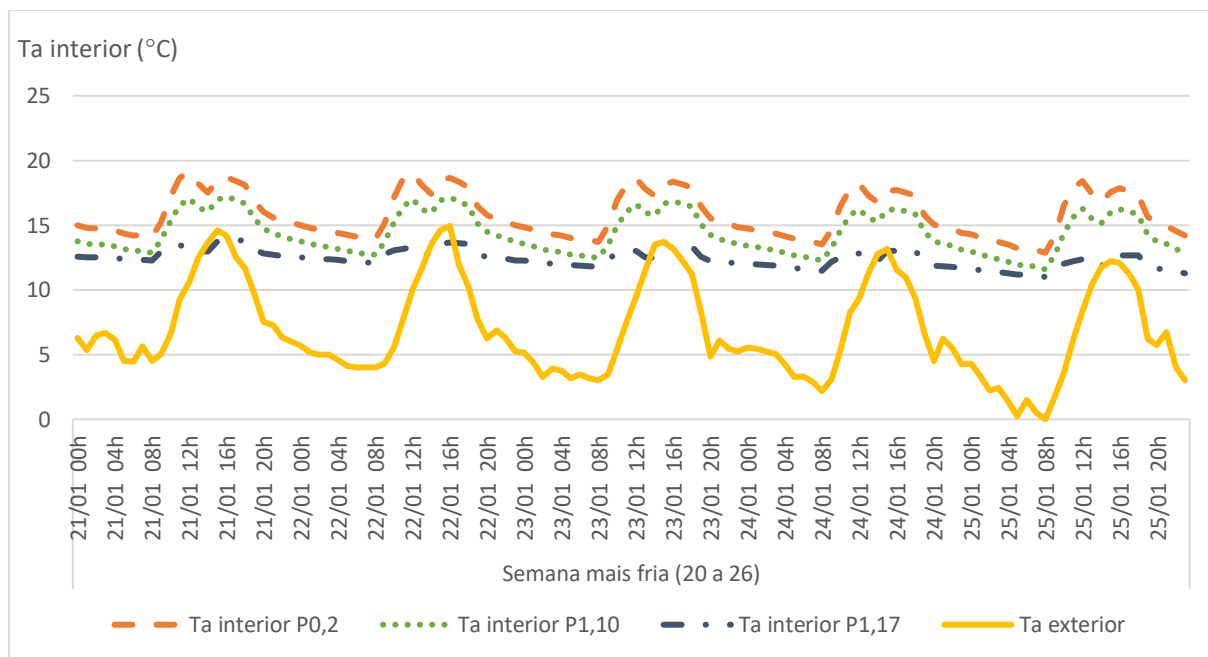


Figura 113 - Temperatura ambiente interior das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB

Durante o período de ocupação a temperatura operativa varia de $11,3^{\circ}\text{C}$ (às 08:00h) a $19,0^{\circ}\text{C}$ (às 12:00h). Através da análise da Figura 114, verifica-se que nas salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$, os ocupantes não se encontram no intervalo de conforto, durante toda a semana, pois a temperatura operativa é

sempre inferior a 20°C. Tal como acontecia se implementada a solução de reabilitação implantada e no edifício não reabilitado, a solução de reabilitação nZEB, nos dias mais frios não assegura, sem climatização, o conforto térmico dos ocupantes.

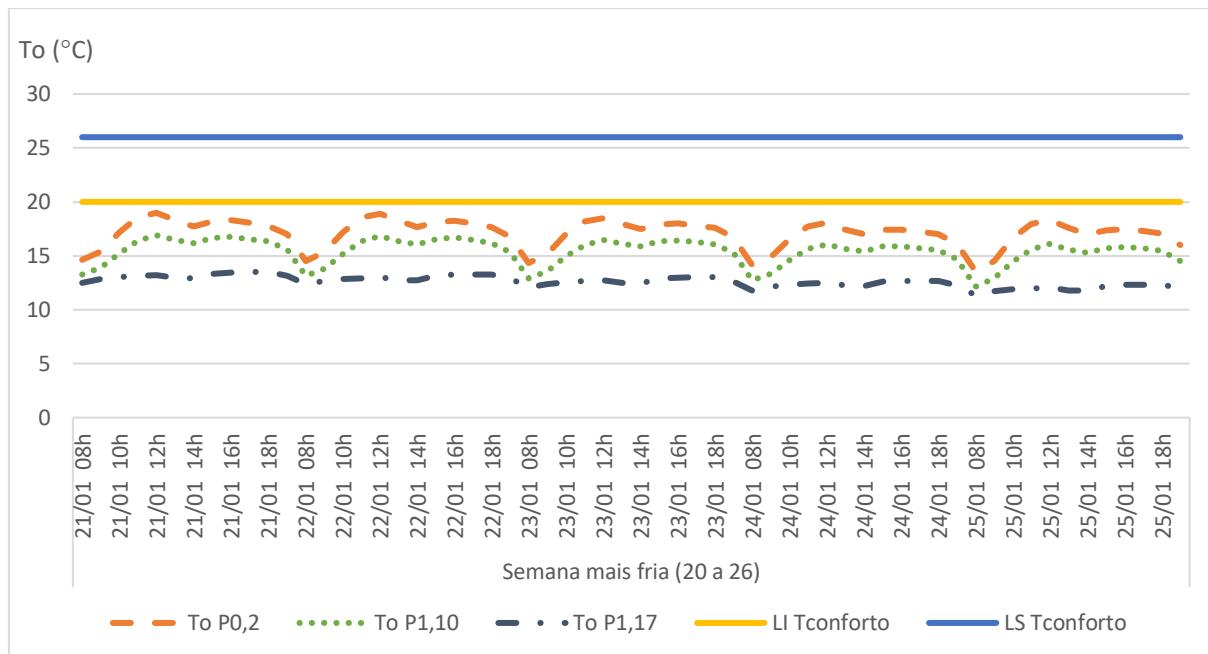


Figura 114 - Temperatura operativa das salas de aulas P_{0,2}, P_{1,10} e P_{1,17} para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB

Comparando o edifício antes da reabilitação, com a implementação da solução de reabilitação nZEB, a temperatura operativa da sala de expressão plástica P_{1,17} aumenta 0,5°C, com a colocação de sistema de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores (de 8cm) e com o aumento do isolamento térmico na cobertura (de 16cm). Existe uma diminuição da temperatura operativa na sala de aula P_{0,2}, de 1,3°C, e na sala de aula P_{1,10}, de 0,8°C, devido principalmente à instalação das palas de sombreamento, o que diminui os ganhos solares, apesar da redução das perdas pela envolvente opaca.

Por fim, comparando o edifício com a implementação da solução de reabilitação, com a implementação da solução de reabilitação nZEB, verifica-se um aumento da temperatura operativa, de 0,1°C, na sala de expressão plástica P_{1,17}, devido à aplicação de sistema de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores, de 8cm, e ao aumento do isolamento da cobertura de 6cm para 16cm, existe uma diminuição da temperatura operativa na sala de aula P_{0,2}, de 0,1°C, devido à aplicação de sistema de isolamento térmico contínuo, de 8cm, nas paredes exteriores, e na sala de aula P_{1,10}, de 1,4°C, devido à instalação de uma pala de sombreamento, apesar da aplicação de sistema de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores para 8cm e do aumento do isolamento térmico da cobertura para 16cm.

No dia mais frio, 2 de janeiro, verifica-se que a temperatura interior das salas de aulas $P_{0,2}$ e $P_{1,10}$ é superior à sala de expressão plástica $P_{1,17}$ (Figura 115), pois as salas de aulas $P_{0,2}$ e $P_{1,10}$ têm ganhos solares (são orientadas a sudeste) e a sala de expressão plástica $P_{1,17}$ não tem ganhos solares (está orientada a noroeste). As salas de aulas $P_{0,2}$ e $P_{1,10}$ têm as mesmas cargas internas, área de envidraçados, possuem palas de sombreamentos e têm isolamento térmico, de 8cm, nas paredes exteriores, contudo a sala de aula $P_{1,10}$ tem uma temperatura inferior à sala de aula $P_{0,2}$, porque esta tem maiores perdas de calor (maior área de parede exterior) e também através da cobertura (apesar de ter isolamento térmico, de 16cm, na cobertura).

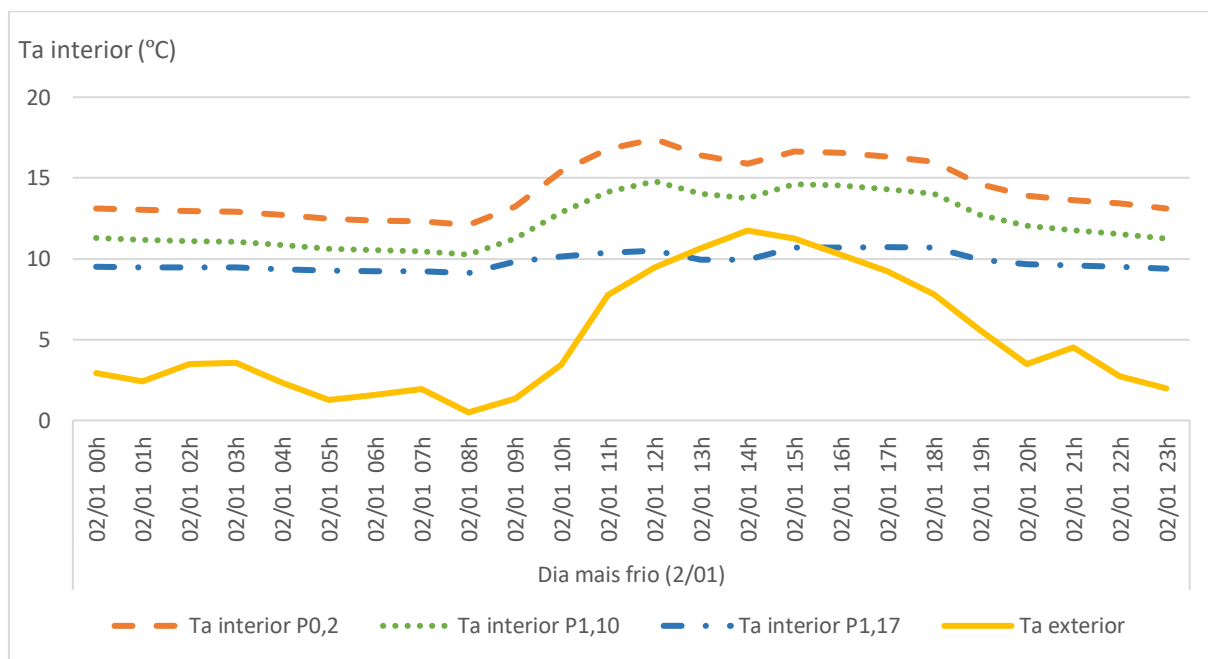


Figura 115 - Temperatura ambiente interior das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB

Comparando o desempenho do edifício antes da reabilitação, com o edifício com a implementação da solução de reabilitação nZEB, verifica-se um aumento da temperatura interior na sala de expressão plástica, $P_{1,17}$, de 0,8°C, devido ao reforço do isolamento térmico. Na sala de aula $P_{0,2}$ existe uma diminuição da temperatura interior, de 1,5°C, devido à instalação de uma pala de sombreamento, o reforço do isolamento térmico tem um efeito reduzido no comportamento do espaço. Na sala de aula $P_{1,10}$ existe uma diminuição da temperatura interior, de 0,6°C, devido à instalação da pala de sombreamento, e às perdas de calor através das paredes exteriores e da cobertura.

Comparando o edifício com a implementação da solução de reabilitação, com a implementação da solução de reabilitação nZEB, verifica-se um aumento da temperatura interior na sala de expressão

plástica $P_{1,17}$, de $0,4^{\circ}\text{C}$, e na sala de aula $P_{0,2}$, de $0,1^{\circ}\text{C}$, devido à redução das perdas através da envolvente opaca, devido à aplicação de sistema de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores de 8cm na duas salas, e ao aumento do isolamento térmico na cobertura de 6cm para 16cm na sala de aula $P_{1,17}$. Na sala de aula $P_{1,10}$, verifica-se uma diminuição da temperatura interior, de $0,8^{\circ}\text{C}$, devido ao efeito das palas de sombreamento, que se sobrepõem à aplicação de sistema de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores de 8cm e ao aumento do isolamento térmico na cobertura de 6cm para 16cm.

A temperatura operativa, no dia mais frio, varia de $9,4^{\circ}\text{C}$ a $17,3^{\circ}\text{C}$ (ver Figura 116). Durante o período de ocupação, antes e depois da implantação da solução de reabilitação e da implementação da solução de reabilitação nZEB, os ocupantes do edifício do ensino básico – 1º ciclo encontram-se fora do intervalo de conforto, pois a temperatura operativa é inferior a 20°C . A temperatura operativa na sala de aula $P_{1,17}$ aumentou, devido à redução das perdas através das paredes e cobertura, em relação ao edifício sem qualquer intervenção de reabilitação, e devido à colocação do isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores e ao aumento do isolamento térmico na cobertura, em relação ao edifício com a implementação da solução de reabilitação.

Na sala de aula $P_{1,10}$, a temperatura operativa diminui, em relação ao edifício sem qualquer intervenção de reabilitação e em relação ao edifício com a implementação da solução de reabilitação, devido à colocação de pala de sombreamento, diminuindo os ganhos solares que têm maior impacto que a redução das perdas de calor através das paredes exteriores e da cobertura.

Por fim, na sala de aula $P_{0,2}$, existe uma diminuição de temperatura operativa, comparativamente à situação inicial, devido à colocação da pala de sombreamento, diminuindo os ganhos solares, não sendo perceptível o efeito da redução das perdas através da envolvente opaca, devido à colocação de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores e ao aumento do isolamento térmico na cobertura, e um aumento de temperatura operativa, em relação ao edifício com a implementação da solução de reabilitação, devido ao efeito da aplicação de sistema de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores.

Não foi realizada a análise de conforto térmico, no dia 2 de janeiro, uma vez que a temperatura exterior média mensal é inferior a $9,4^{\circ}\text{C}$.

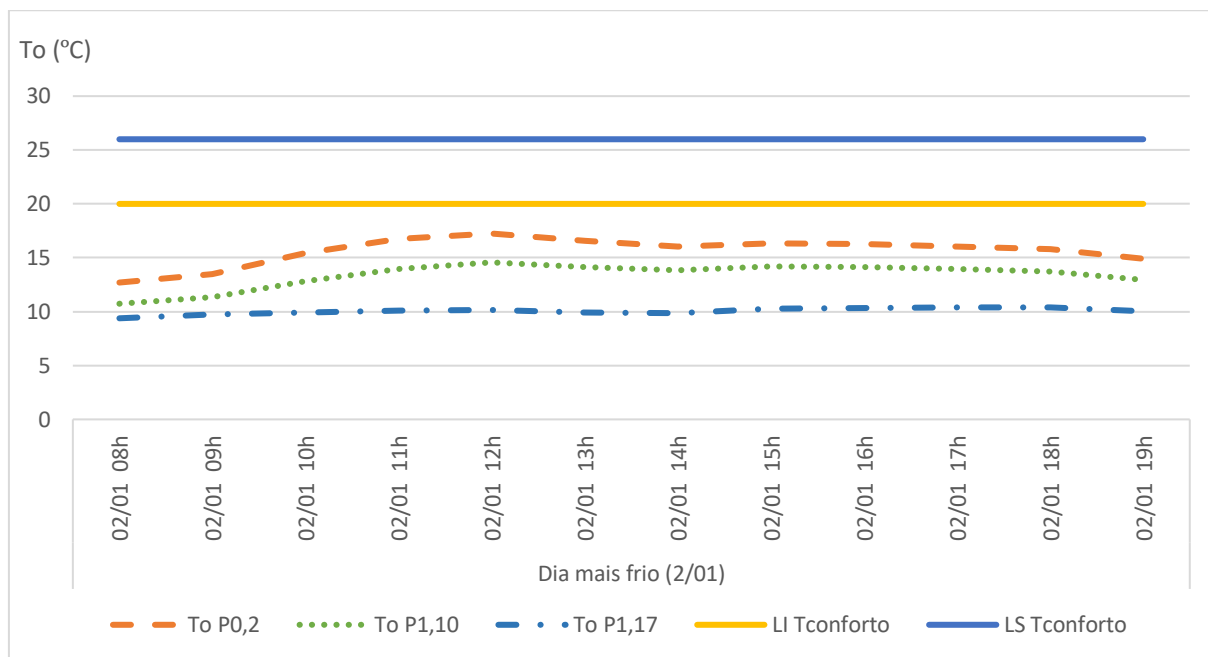


Figura 116 - Temperatura operativa das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB

Na semana de 17 a 21 de junho, durante o período de ocupação, a temperatura interior das salas de aulas varia de 20,8°C (às 08:00h) a 29°C (às 15:00h) (Figura 117). A sala de expressão plástica $P_{1,17}$, tem menor temperatura interior que as salas de aulas $P_{0,2}$ e $P_{1,10}$, porque não tem ganhos solares (orientada a noroeste), e a sala de aula $P_{1,10}$, tem maior temperatura interior que a sala de aula $P_{0,2}$, pois tem maiores ganhos de calor através das paredes exteriores e da cobertura.

Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, a temperatura interior das três salas de aulas diminui, devido à colocação de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores e ao aumento do isolamento térmico na cobertura, existindo uma maior diminuição na sala de aula $P_{0,2}$ devido também ao efeito da instalação de uma pala de sombreamento (existe uma redução anual, de 32,2%, devida às perdas através da envolvente e de 42,2%, devido aos ganhos solares), comparativamente ao edifício antes da reabilitação. Comparando o edifício com a implementação da solução de reabilitação e com a implementação da solução de reabilitação nZEB, verifica-se que a temperatura interior das três salas de aulas diminui, devido ao aumento do isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores e ao aumento do isolamento térmico na cobertura sendo que existe maior diminuição na sala de aula $P_{1,10}$, pois esta passa a ter pala de sombreamento, diminuindo os ganhos solares (existe uma redução anual, de 10,6%, devida às perdas através da envolvente e de 14,3%, devido aos ganhos solares).

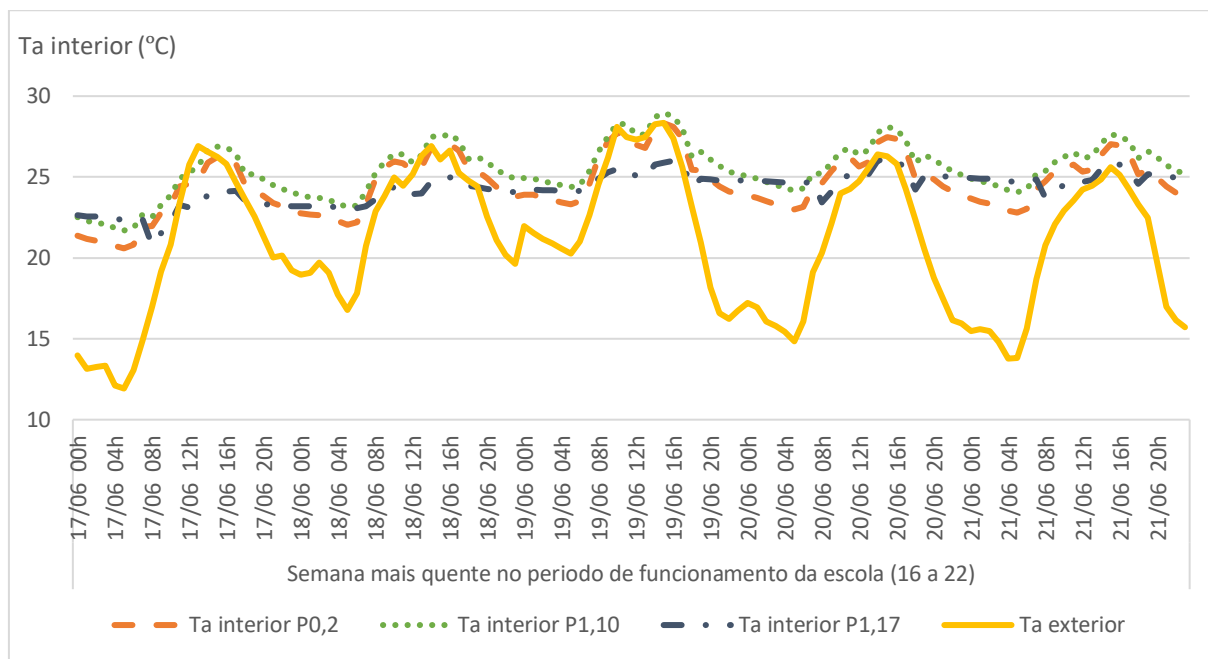


Figura 117 - Temperatura ambiente interior das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB

Durante o período de ocupação, na semana mais quente, a temperatura operativa varia de 21,8°C e 28,6°C. Os ocupantes da sala de aula $P_{0,2}$, das 08:00h às 12:00h e das 14:00h às 19:00h no dia 17 de junho, das 08:00h às 12:00h e das 18:00h às 19:00h no dia 18 de junho, das 18:00h do dia 19 de junho às 19:00h do dia 20 de junho, das 18:00h às 19:00h do dia 20 de junho e das 08:00h às 12:00h e das 18:00h às 19:00h no dia 21 de junho, e os ocupantes da sala de aula $P_{1,10}$, das 08:00h às 12:00h e das 18:00h às 19:00h no dia 17 de junho e das 08:00h às 10:00h no dia 18 de junho, estão no intervalo de conforto. Os ocupantes da sala de expressão plástica $P_{1,17}$, durante toda a semana, não estão no intervalo de conforto (ver Figura 118).

Na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, com o edifício sem/com a implementação da solução de reabilitação e com a implementação da solução de reabilitação nZEB, verifica-se que os seus ocupantes estão sempre numa situação de conforto. Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, os ocupantes das salas de aulas $P_{0,2}$ e $P_{1,10}$, passam a estar confortáveis mais 14 horas na semana, em relação ao edifício antes da reabilitação, e passam a estar confortáveis mais 35 horas na semana, em relação ao edifício com a implementação da solução de reabilitação.

No dia mais quente (19 de junho), durante o período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, a temperatura exterior varia de 20,9°C a 28,4°C, e a temperatura interior nas três salas de aulas varia

de 24,4°C a 29,0°C (ver Figura 119). Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, verifica-se uma diminuição da temperatura interior nas três salas, de 0,3°C na sala de expressão plástica P_{1,17}, devido à colocação de isolamento térmico contínuo de 8cm nas paredes exteriores e ao aumento do isolamento térmico de 6cm para de 16cm na cobertura, de 0,9°C na sala de aula P_{1,10}, pois para além da colocação de isolamento térmico nas paredes exteriores e o aumento do isolamento térmico na cobertura, foi instalada uma pala de sombreamento diminuindo os ganhos solares, e de 1,3°C na sala de aula P_{0,2}, devido à colocação de uma pala de sombreamento e ao isolamento térmico na paredes exterior, em relação ao edifício antes da reabilitação. Na sala de aula P_{0,2} existe uma maior diminuição de temperatura em relação às outras salas de aulas, porque existe menor transferência de calor através da parede exterior (menor área de superfície exterior).

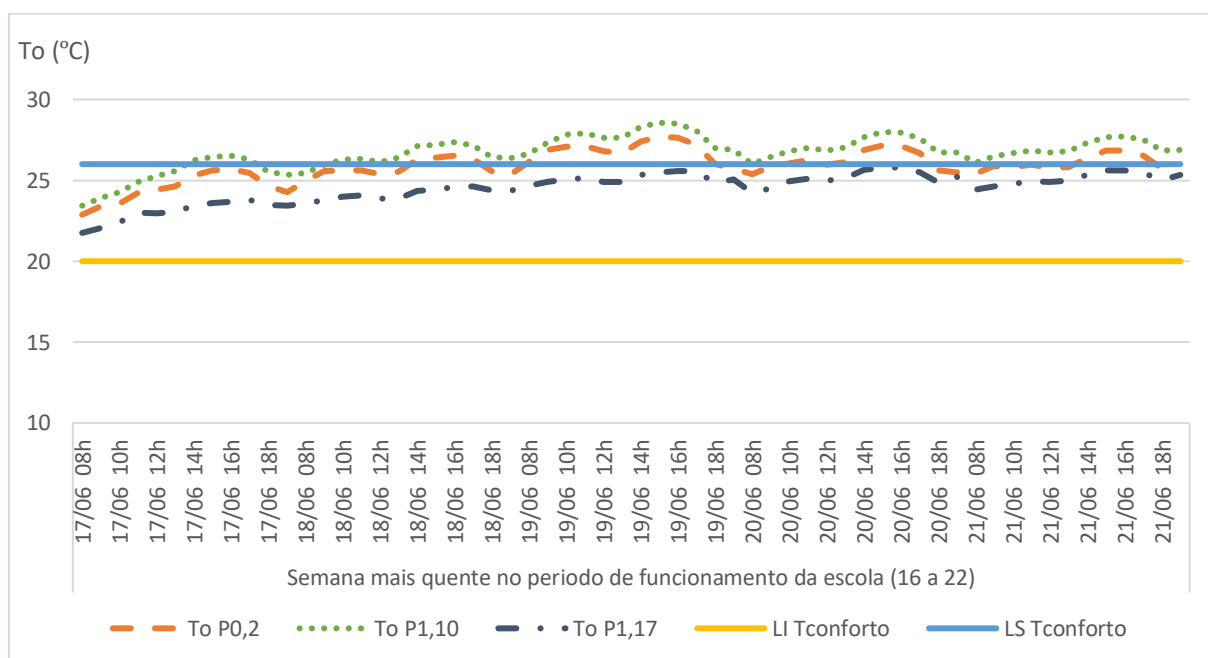


Figura 118 - Temperatura operativa das salas de aulas P_{0,2}, P_{1,10} e P_{1,17} para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB

Comparando o edifício com a solução de reabilitação e com a solução de reabilitação nZEB, verifica-se que a temperatura interior diminui, 0,1°C, na sala de expressão plástica P_{1,17}, devido à aplicação de sistema de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores e ao aumento do isolamento térmico na cobertura, 0,2°C, na sala de aula P_{0,2}, devido à aplicação de sistema de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores, e 0,6°C, na sala de aula P_{1,10}, devido principalmente à colocação de uma pala de sombreamento, diminuindo os ganhos solares, e à

aplicação de sistema de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores e ao aumento do isolamento térmico na cobertura.

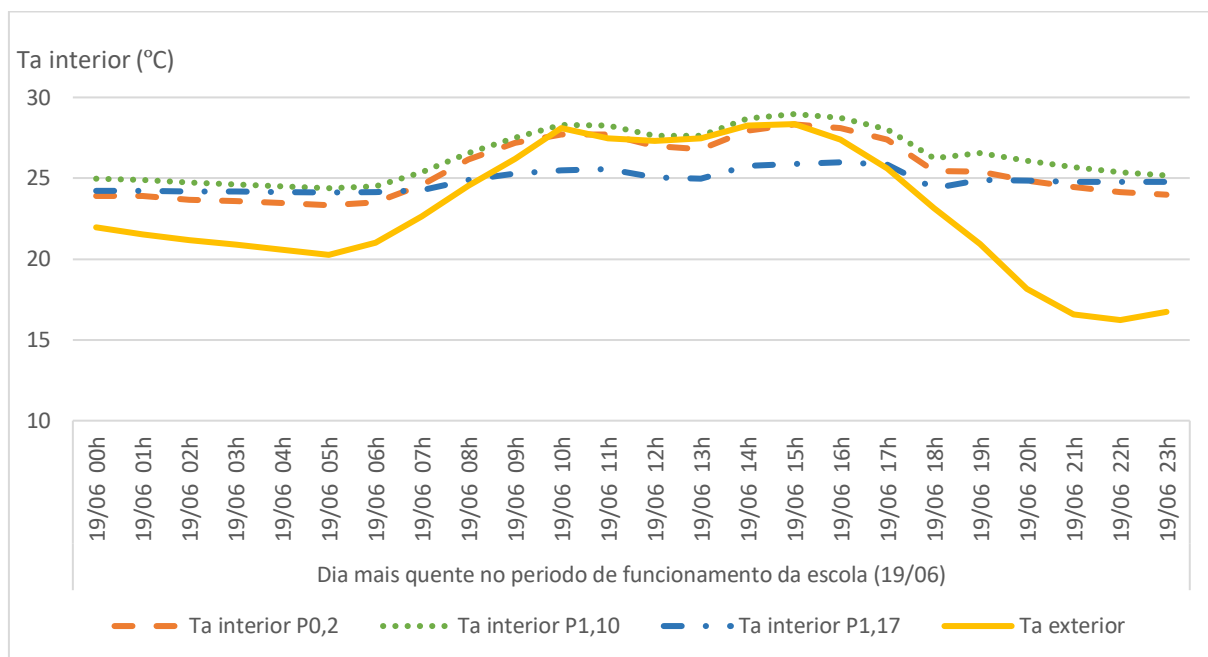


Figura 119 - Temperatura ambiente interior das salas de aulas P_{0,2}, P_{1,10} e P_{1,17} para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB

Durante o dia 19 de junho, os seus ocupantes estão no intervalo de conforto na sala de expressão plástica P_{1,17}, pois a temperatura operativa varia de 24,7°C e 25,6°C, e às 19:00h na sala de aula P_{0,2}. Na sala de aula P_{1,10} e das 08:00h às 18:00h na sala de aula P_{0,2}, os seus ocupantes estão fora do intervalo de conforto, pois a temperatura operativa é superior a 26°C (Figura 120). Com a implementação da solução de reabilitação nZEB, verifica-se que os ocupantes da sala de expressão plástica P_{1,17}, continuam em conforto durante 9 horas, e os ocupantes da sala de aula P_{0,2}, passam a estar em conforto 1 hora durante o dia 19 de junho, em relação à situação inicial.

Através da análise do conforto térmico, pelo modelo de conforto térmico adaptativo (ASHRAE 55, 2017), para o dia mais quente, tendo em consideração que a temperatura exterior média mensal é igual a 17,82°C e as temperaturas operativas das salas de aulas do piso 0 variam de 25,16°C a 25,80°C, a temperatura operativa das salas de aulas do piso 1 variam de 26,50°C a 26,57°C e a sala de expressão plástica P_{1,17} que tem um valor de temperatura operativa de 24,86°C, verifica-se que os ocupantes das salas de aulas (piso 0 e piso1) e da sala de expressão plástica P_{1,17} estão em conforto (ver Figura 121).

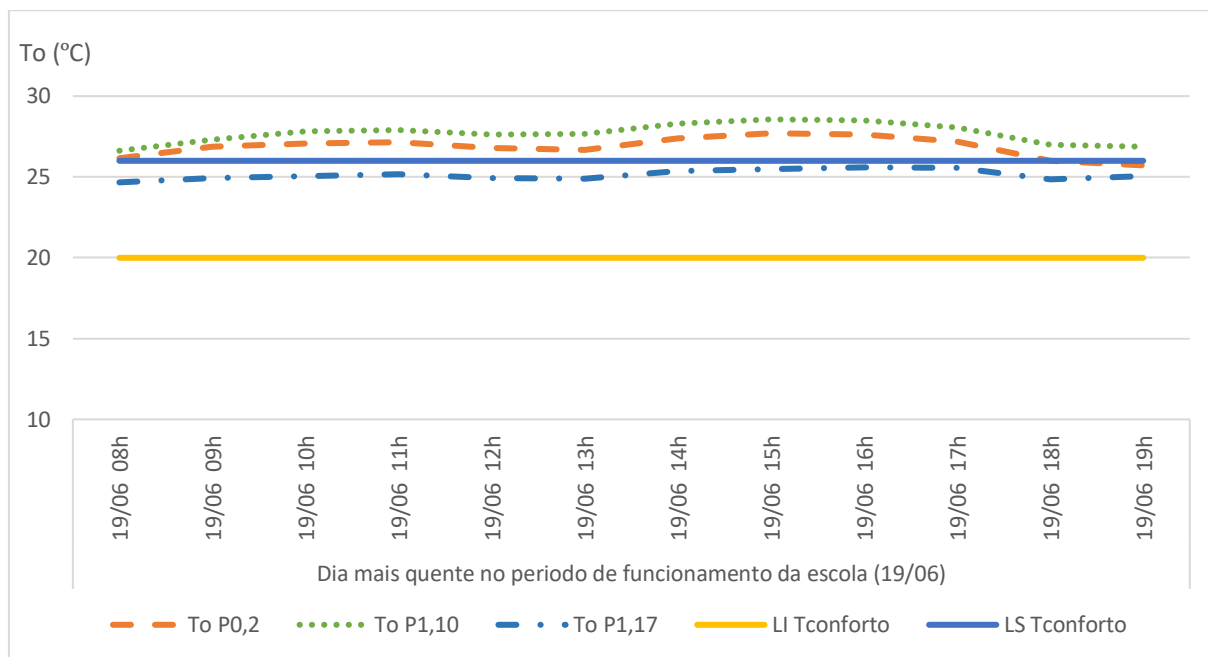


Figura 120 - Temperatura operativa das salas de aulas P_{0,2}, P_{1,10} e P_{1,17} para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB

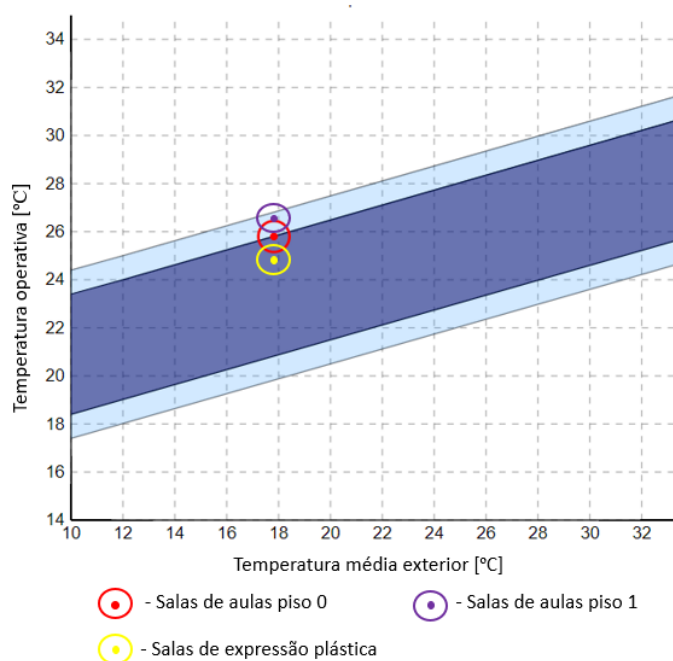


Figura 121 - Modelo de conforto térmico adaptativo, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica P_{1,17}, considerando a situação mais desfavorável (CBE Thermal Comfort Tool, 2019)

Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, no dia 19 de junho, verifica-se que os ocupantes das salas de aulas do piso 0 e do piso 1 estavam numa situação de desconforto e passam a estar numa

situação de conforto, devido à colocação de sistema de isolamento térmico contínuo pelo exterior, de 8cm, nas paredes exteriores e ao aumento de isolamento térmico, para 16cm, na cobertura, diminuindo a entrada de calor, e à instalação de palas de sombreamento em todas as salas de aulas do piso 0 e do piso 1, diminuindo os ganhos solares, na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, os seus ocupantes continuam numa situação de conforto, em comparação com o edifício antes da reabilitação.

Comparando o desempenho do edifício com a implementação da solução de reabilitação nZEB, em relação ao edifício com a solução de reabilitação implementada, verifica-se que os ocupantes das salas de aulas do piso 0 e a sala de expressão plástica $P_{1,17}$, continuam numa situação de conforto. Enquanto que os ocupantes das salas de aulas do piso 1, que estavam numa situação de desconforto passam a estar numa situação de conforto.

4.6. Desempenho termo-energético da solução de reabilitação nZEB – com sistema AVAC ativo

A análise de desempenho do conforto térmico, com sistema de climatização ativo, é realizada pelo método da zona de conforto da ASHRAE 55 (ASHRAE 55, 2017). Para a semana e dia, mais frio e mais quente, com sistema de climatização, foi feita a verificação se a temperatura operativa se encontra ou não no intervalo de conforto (sendo a temperatura mínima no inverno de 20°C e a temperatura máxima no verão de 26°C), pela norma EN 15251, tendo em conta que se trata de um edifício em fase de reabilitação (Categoria II) (EN 15251, 2006).

4.6.1. Desempenho termo-energético da zona do jardim de infância

4.6.1.1. Desempenho térmico da zona do jardim de infância

Na semana mais fria, durante o período de ocupação do jardim de infância, a temperatura interior varia de 12,2°C a 22,2°C, o menor valor corresponde à sala de aula $J_{0,3}$ e o maior valor corresponde à sala de aula $J_{0,1}$, devido aos ganhos solares, pois as salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ estão orientadas a sul e a sala de aula $J_{0,3}$ está orientada a norte. Durante a semana, a temperatura interior vai aumentando a partir das 08:00h, até atingir uma temperatura de 20°C pelas 10:00h, e entre as 10:00h e as 19:00h a temperatura interior mantém-se entre os 20°C e os 22,2°C, devido à existência de sistema AVAC, cuja a temperatura interior

mínima, no inverno, é de 20°C e o período de funcionamento deste é entre as 08:00h e as 19:00h, nas salas de aulas do jardim de infância (ver Figura 122). Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, a temperatura interior máxima, aumenta aproximadamente 0,1°C, nas salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$, no período de ocupação, devido ao aumento do isolamento térmico, nas paredes exteriores e na cobertura plana. Na sala de aula $J_{0,3}$ a temperatura interior máxima não alterou, em relação ao edifício antes da reabilitação.

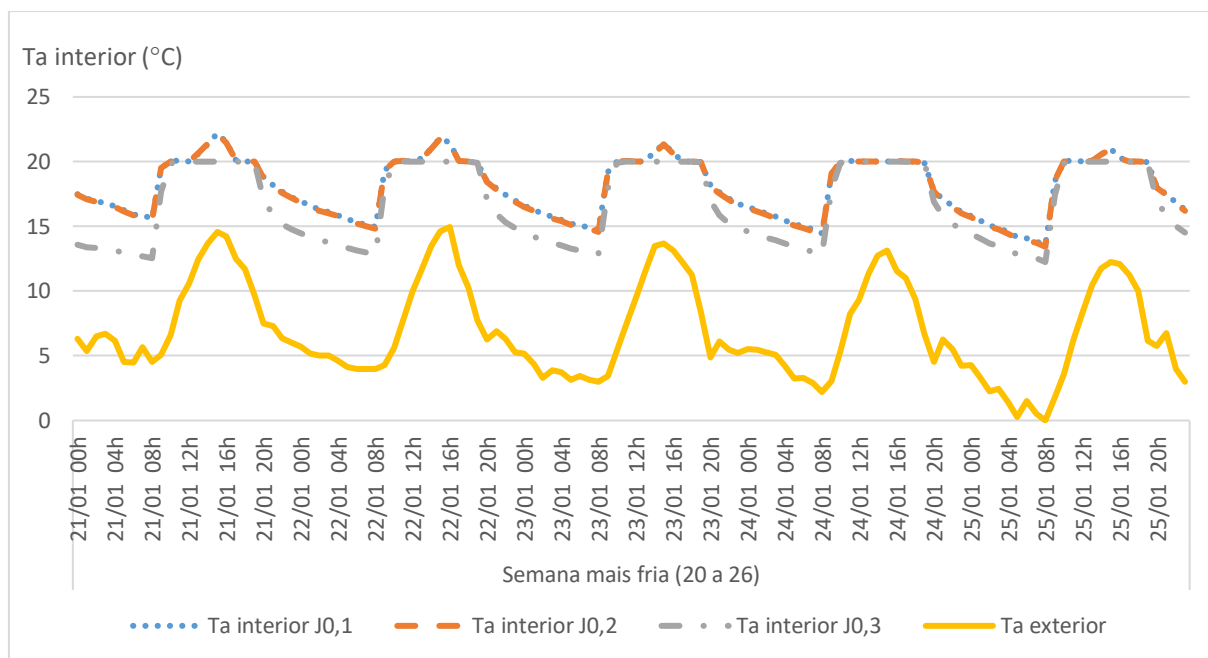


Figura 122 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais fria no jardim de infância – solução nZEB

Na semana de 21 a 25 de janeiro, durante o período de ocupação, a temperatura operativa varia de 12,9°C a 23,5°C. Nas salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$, os seus ocupantes estão no intervalo de conforto das 11:00h às 12:00h e das 14:00h às 19:00h nos dias 21, 22, 23 e 25 de janeiro e das 11:00h às 12:00h e das 14:00h às 18:00h no dia 24 de janeiro, e na sala de aula $J_{0,3}$, os seus ocupantes estão durante toda a semana fora do intervalo de conforto (ver Figura 123).

Comparando o edifício com a implementação da solução de reabilitação nZEB e antes da reabilitação, verifica-se que os ocupantes das salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ passam a estar em conforto mais 1 hora nos dias 22, 23, e 25 de janeiro, ou seja, no total dos três dias passam a estar em conforto mais 3 horas, e mais 2 horas no dia 24 de janeiro, enquanto que a sala de aula $J_{0,3}$ a temperatura operativa aumenta, aproximando-se da situação de conforto (20°C), contudo continua numa situação de desconforto durante a semana mais fria.

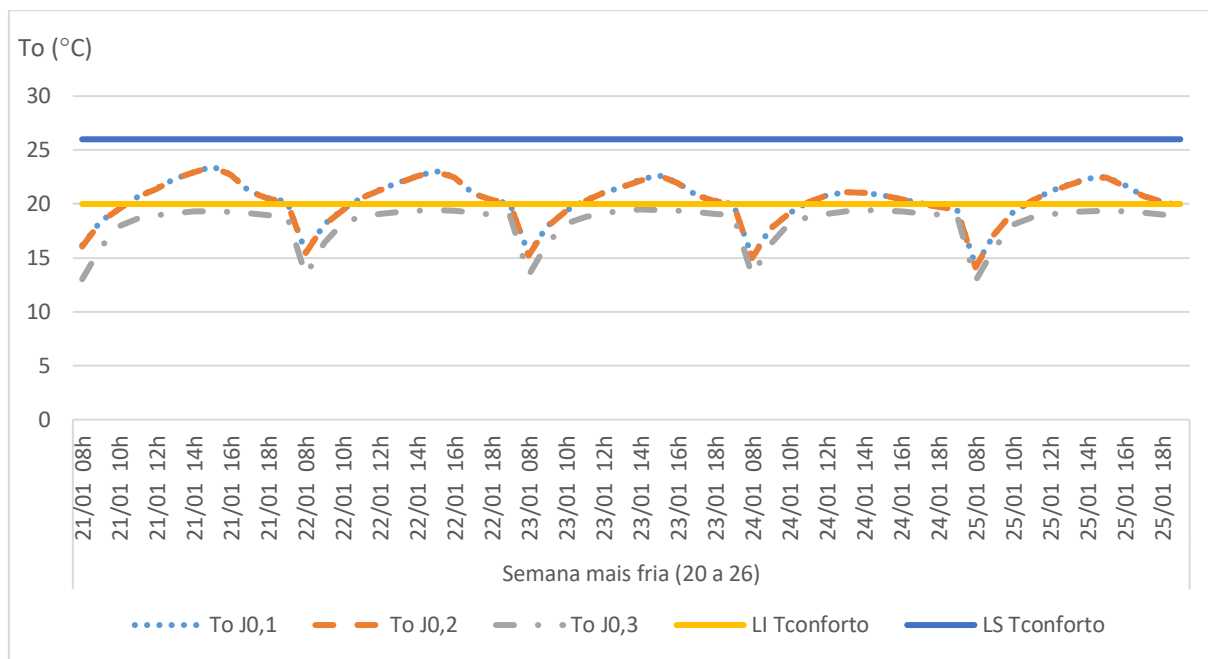


Figura 123 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais fria no jardim de infância – solução nZEB

Durante o inverno, no dia mais frio, verifica-se que no período de ocupação do jardim de infância, a temperatura interior varia de 12,0°C a 20,2°C. As salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ (orientadas a sul), têm temperatura interior superior à sala de aula $J_{0,3}$ (orientada a norte), devido aos maiores ganhos solares. O sistema AVAC, liga às 08:00h em que a temperatura interior vai aumentando gradualmente até que atinge uma temperatura de 20°C pelas 11:00h, na sala de aula $J_{0,3}$ e nas salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ atinge mais cedo, pelas 10:00h, mantendo as três salas de aulas uma temperatura constante, aproximadamente de 20°C, até às 19:00h, hora em que o sistema é desligado (20°C é a temperatura interior mínima considerada no sistema AVAC, no inverno) (ver Figura 124).

Com o aumento de isolamento térmico nas paredes exteriores e na cobertura, verifica-se um aumento da temperatura interior mínima de aproximadamente 0,2°C nas salas de aulas $J_{0,1}$, $J_{0,2}$ e de aproximadamente 0,4°C na sala de aula $J_{0,3}$, e a temperatura interior máxima nas três salas de aulas, é igual a 20°C, devido ao sistema AVAC, em relação ao edifício antes de reabilitação.

Durante o período de ocupação, no dia 2 de janeiro, os ocupantes das salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$, das 11:00h às 17:00h encontram-se no intervalo de conforto. Nas restantes horas, de ocupação das salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ e durante todo o dia na sala de aula $J_{0,3}$, os seus ocupantes encontram-se fora do intervalo de conforto (ver Figura 125). Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, existe um aumento

da temperatura operativa máxima, de aproximadamente $0,2^{\circ}\text{C}$, nas salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ e $J_{0,3}$, no entanto apenas os ocupantes das salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$, passam a estar mais 1 horas em situação de conforto.

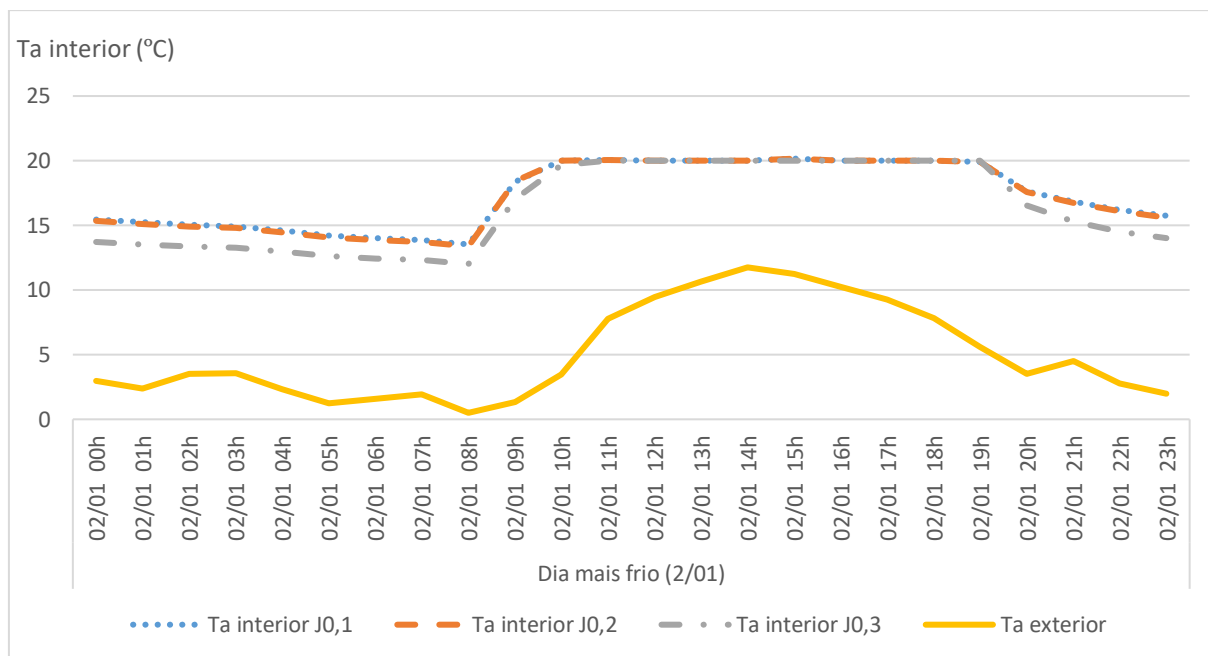


Figura 124 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais frio no jardim de infância – solução nZEB

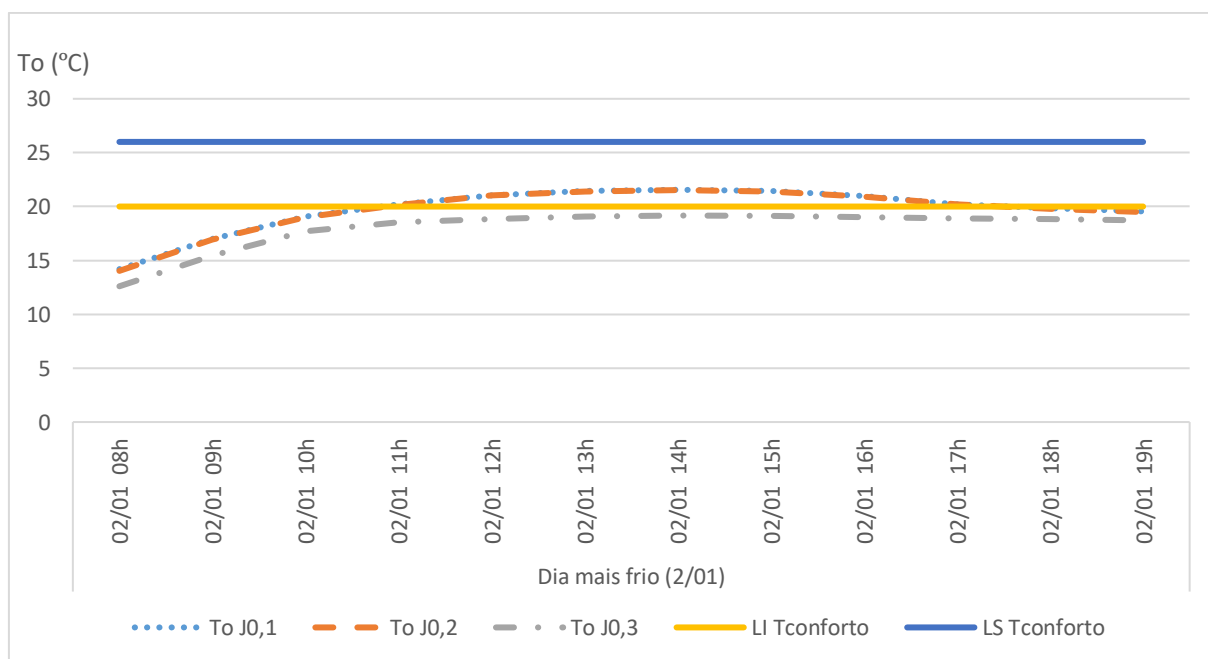


Figura 125 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais frio no jardim de infância – solução nZEB

Através da análise do conforto térmico, pelo método da zona de conforto (ASHRAE 55, 2017), para o dia 2 de janeiro, as temperaturas operativas das salas de aulas, do jardim de infância, variam de 16,12°C a 17,82°C, tendo em conta que a taxa metabólica dos ocupantes é de 1,0 met, o isolamento do vestuário no inverno de 1,0 clo, a velocidade média do ar inferior a 0,1 m/s e a humidade relativa de 55,80%, verifica-se que os ocupantes das salas de aulas $J_{0,1}$, $J_{0,2}$ e $J_{0,3}$ estavam em desconforto, e continuam a estar em desconforto, logo o aumento do isolamento térmico nas paredes exteriores e na cobertura não foi suficiente, apesar da temperatura operativa das salas de aulas ter aumentado, aproximando-se do intervalo de conforto (ver Figura 126).

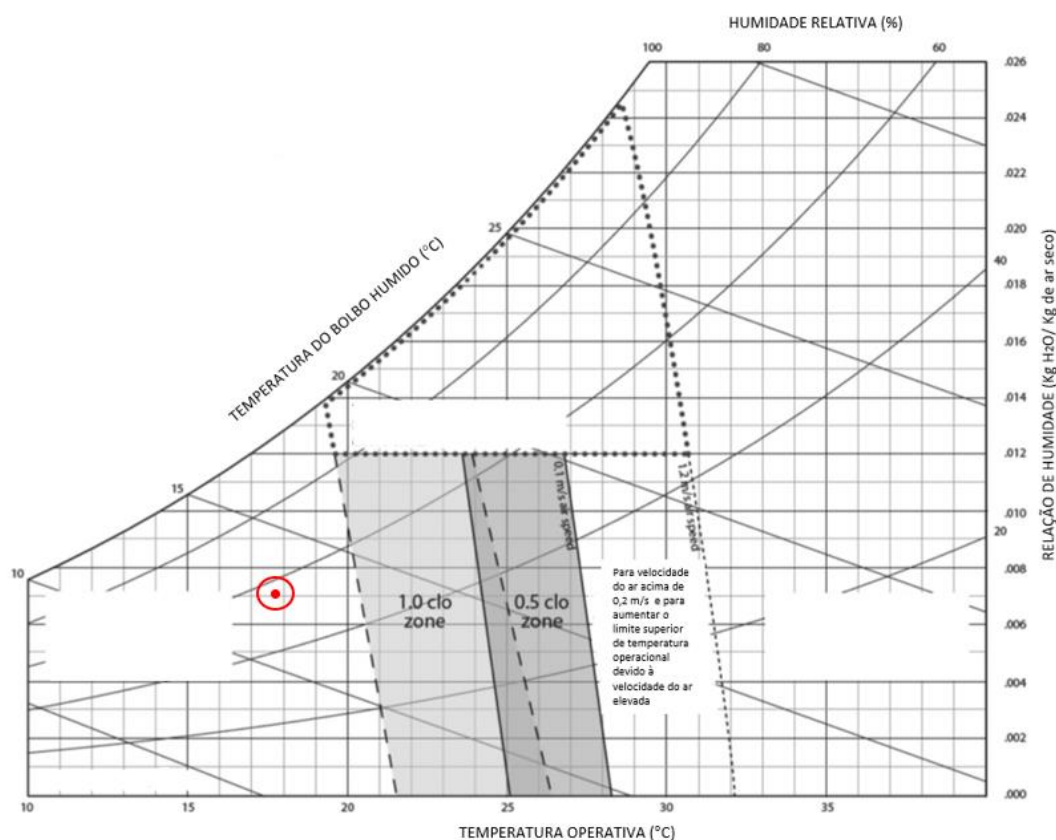


Figura 126 - Método da zona de conforto, para o dia mais frio no período de ocupação da zona do jardim de infância, nas salas de aulas, considerando a situação mais desfavorável (CBE Thermal Confort Tool, 2019)

Na semana de 17 a 21 de junho, durante o período de ocupação do jardim de infância, a temperatura exterior varia de 17,0°C a 28,4°C, e a temperatura interior varia de 20,9°C a 26°C. As temperaturas interiores mínimas das salas de aulas $J_{0,1}$, $J_{0,2}$ e $J_{0,3}$, são de 20,9°C, 21,1°C e 21,2°C respetivamente e a temperatura interior máxima igual a 26°C, 26,2°C e 26,3°C respetivamente, as temperatura interiores máximas são atingidas às 19:00h dos dias da semana, uma vez que o sistema AVAC é desligado a essa

hora, contudo como o período das aulas é até às 18:00h, os ocupante estão em condições de conforto (ver Figura 127). Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, a temperatura interior mínima nas salas de aulas ($J_{0,1}$, $J_{0,2}$ e $J_{0,3}$) diminui aproximadamente $0,8^{\circ}\text{C}$ e a temperatura interior máxima diminui aproximadamente $0,3^{\circ}\text{C}$, em relação ao edifício antes da reabilitação.

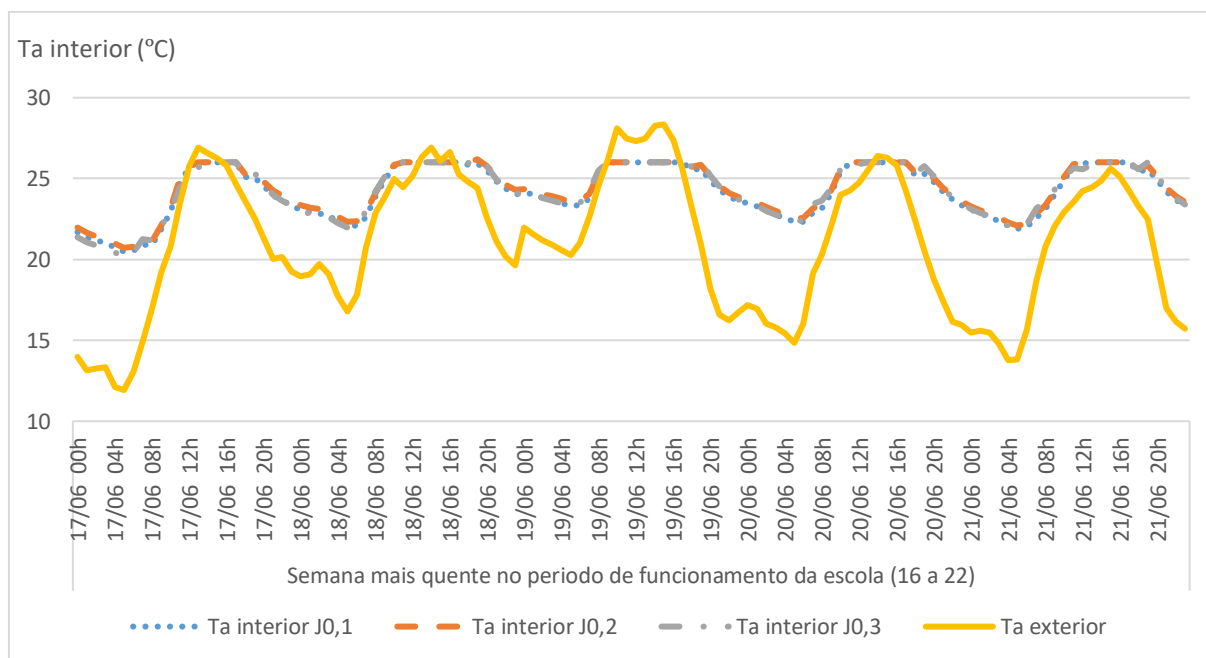


Figura 127 - Temperatura ambiente interior dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – solução nZEB

Na semana mais quente, durante o período de ocupação do jardim de infância, os ocupantes das salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$, estão no intervalo de conforto das 09:00h às 12:00h e das 18:00h às 19:00h no dia 17 de junho, das 08:00h às 10:00h no dia 18, 20 e 21 de junho e das 08:00h às 09:00h do dia 19 de junho, e os ocupantes da sala de aula $J_{0,3}$, estão em conforto no mesmo período que as outras duas salas de aulas, estando ainda mais uma hora em conforto, no dia 21 de junho, das 10:00h às 11:00h, porque a temperatura operativa está compreendida entre 20°C e 26°C (ver Figura 128). Comparando o edifício antes da reabilitação e após a implementação da solução de reabilitação nZEB, verifica-se um aumento das horas de conforto dos ocupantes das três salas de aulas, de 9 horas no dia 17 de junho e de 6 horas no dia 18, 19 e 20 de junho.

No dia mais quente, a temperatura exterior varia de $25,0^{\circ}\text{C}$ a $31,5^{\circ}\text{C}$ e a temperatura interior varia de $23,6^{\circ}\text{C}$ a $29,4^{\circ}\text{C}$, durante o período de ocupação do jardim de infância. A sala de aula $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ atingem maior valor de temperatura interior, de $29,0^{\circ}\text{C}$ e $29,4^{\circ}\text{C}$ respetivamente (às 15:00h), e a sala de aula $J_{0,3}$ atinge o maior valor de temperatura interior, de $28,1^{\circ}\text{C}$ (às 19:00h) (Figura 129). As temperaturas

interiores das três salas de aulas são relativamente próximas, pois a sala de aula $J_{0,3}$ está orientada a norte e as salas de aulas $J_{0,1}$ e $J_{0,2}$ estão orientadas a sul, mas estas duas últimas salas têm palas de sombreamento.

Com o aumento de isolamento térmico nas paredes exteriores e na cobertura, verifica-se uma diminuição ligeira da temperatura interior nas salas de aulas, de aproximadamente $0,2^{\circ}\text{C}$, contudo a temperatura interior é superior a 26°C , ou seja, o sistema não é eficaz no dia mais quente (6 de julho), em relação ao edifício antes da reabilitação.

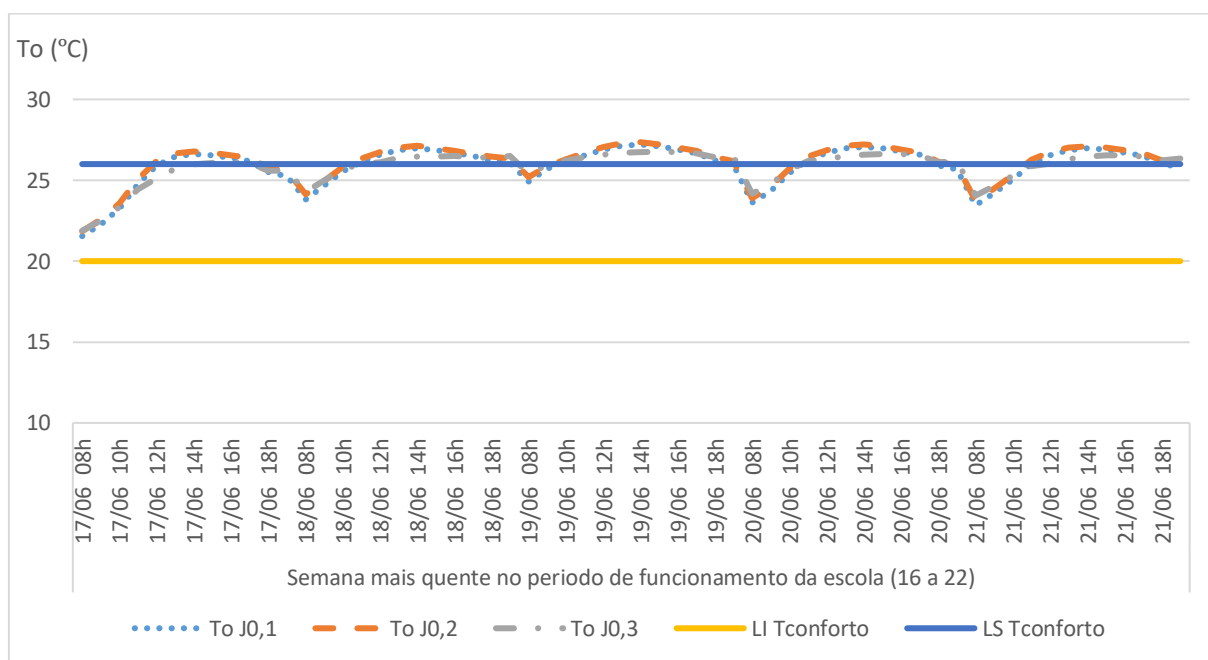


Figura 128 - Temperatura operativa dos espaços para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – solução nZEB

No dia 6 de julho, os ocupantes do jardim de infância encontram-se no intervalo de conforto, das 08:00h às 10:00h nas salas de aulas $J_{0,1}$, $J_{0,2}$ e $J_{0,3}$, nas restantes horas do dia não se encontram no intervalo de conforto, pois a temperatura operativa é superior a 26°C (ver Figura 130). Com a implementação da solução de reabilitação nZEB, os ocupantes da sala de aula $J_{0,2}$ passam a estar em conforto mais 1 hora durante o dia, comparativamente com o edifício antes de reabilitação.

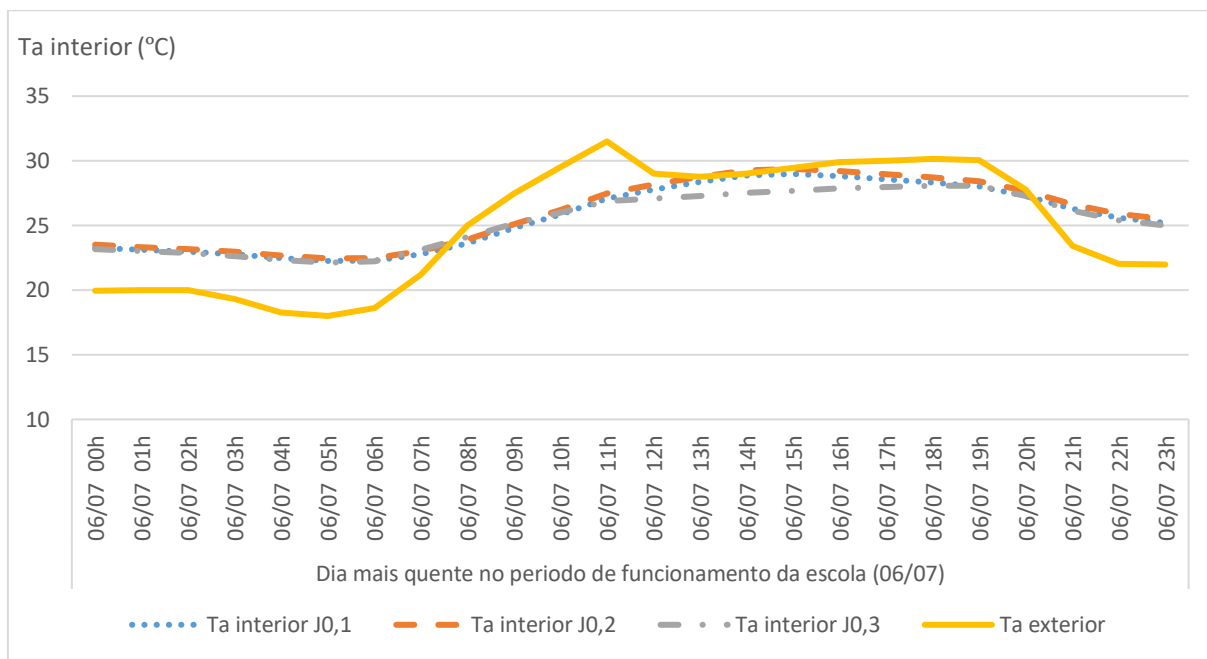


Figura 129 - Temperatura ambiente interior dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – solução nZEB

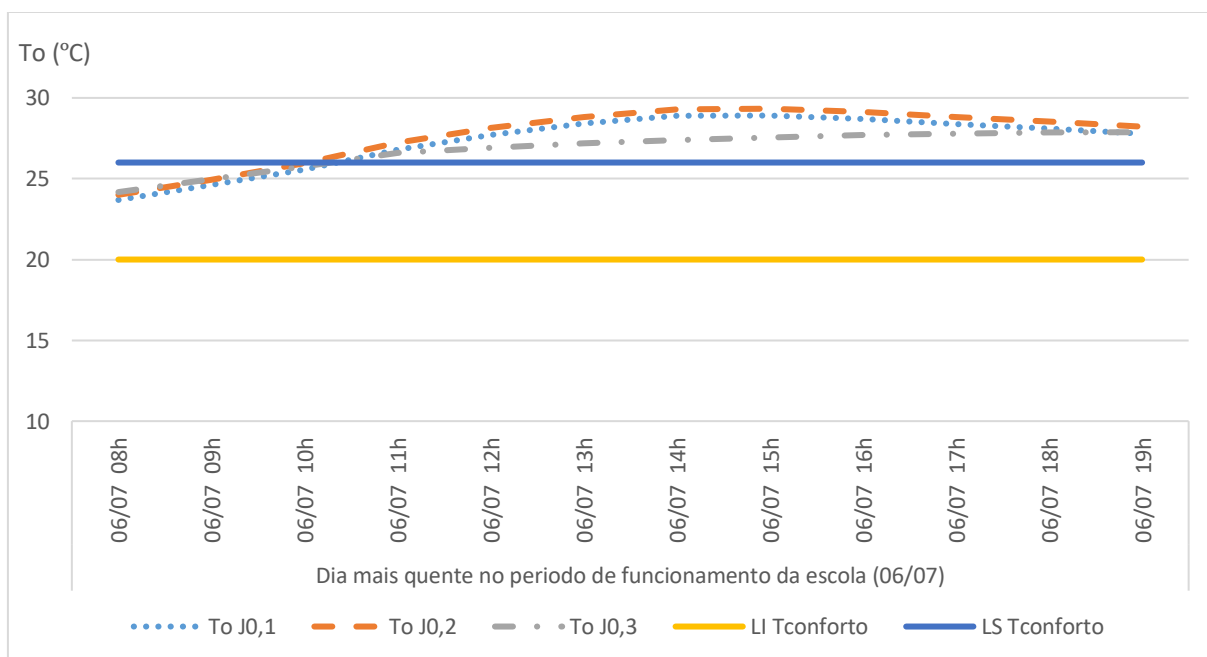


Figura 130 - Temperatura operativa dos espaços para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no jardim de infância – solução nZEB

Através da análise do conforto térmico, pelo método da zona de conforto (ASHRAE 55, 2017), para o dia mais quente (6 de julho), as temperaturas operativas das salas de aulas, do jardim de infância, variam de 25,44°C a 26,07°C, tendo em conta que a taxa metabólica dos ocupantes é de 1,0met, o

isolamento do vestuário no verão de 0,5clo, a velocidade média do ar inferior a 0,1m/s e a humidade relativa de 55,80% (Figura 131), verifica-se que os ocupantes das salas de aulas J_{0,1} e J_{0,2}, estavam em conforto e continuam em situação de conforto. Na sala de aula J_{0,3}, os ocupantes estavam em desconforto, e com a implementação da solução de reabilitação nZEB, passam a estar em conforto.

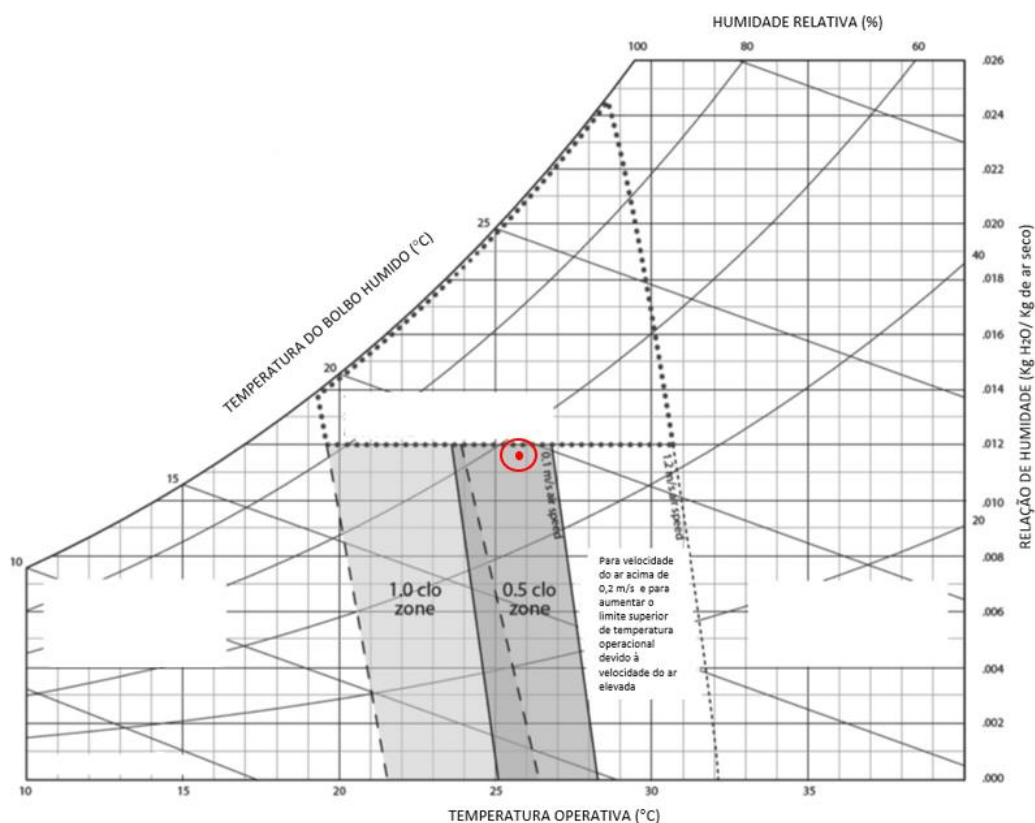


Figura 131 - Método da zona de conforto, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do jardim de infância, nas salas de aulas, considerando a situação mais desfavorável (CBE Thermal Confort Tool, 2019)

4.6.1.2. Necessidades de aquecimento e arrefecimento da zona do jardim de infância

As necessidades energéticas de aquecimento do edifício com a implementação da solução de reabilitação nZEB são de 33,8kWh/m².ano e as necessidades de arrefecimento são de 1,2kWh/m².ano, na zona do jardim de infância (ver Figura 132). Os meses com necessidades de aquecimento estão compreendidos entre outubro e maio, sendo o mês de janeiro o mais frio com 7,3kWh/m² necessidades de aquecimento. O mês de maio é o menos frio (1,5kWh/m²), e os meses com necessidades de arrefecimento são os

meses de junho, julho e setembro, sendo o mês de setembro o que apresenta maiores necessidades de arrefecimento, com um valor de $0,5\text{kWh}/\text{m}^2$. Agosto não apresenta necessidades de arrefecimento, uma vez que o jardim de infância se encontrar encerrado.

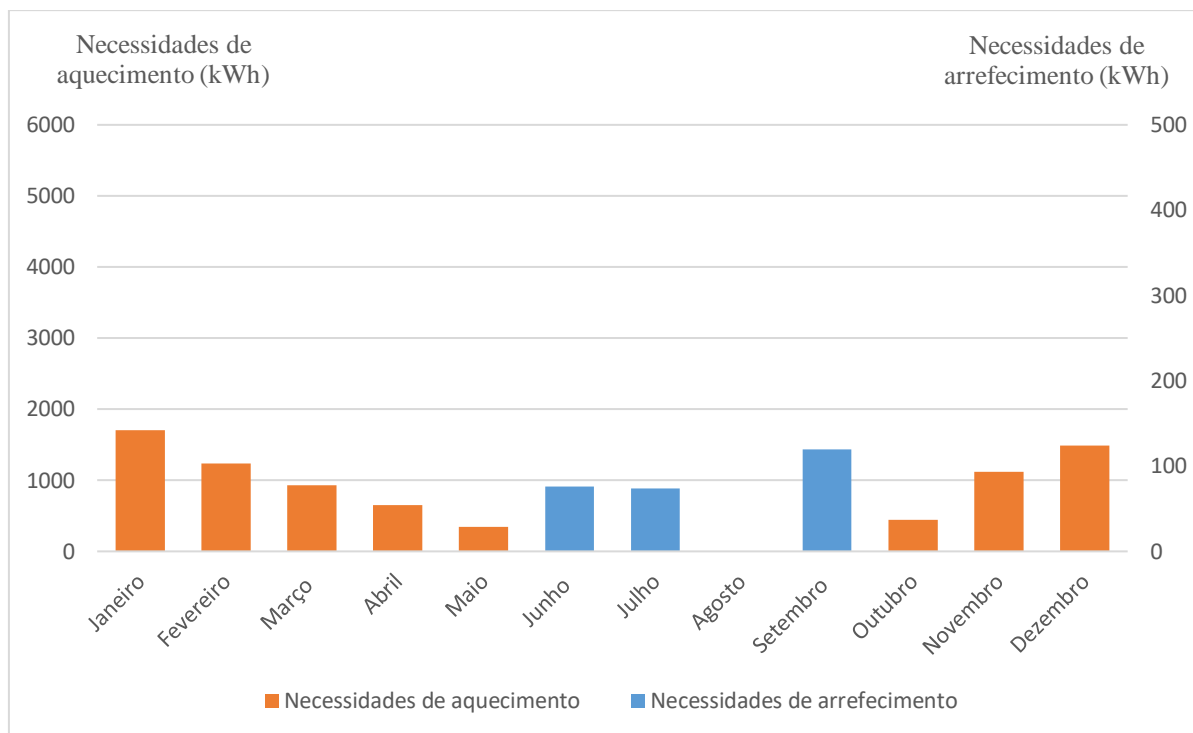


Figura 132 - Necessidades de arrefecimento por mês da zona do jardim de infância – solução nZEB

As perdas através da envolvente, na zona do jardim de infância, são de $124,2\text{kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$, das quais 57,0% são devidas às perdas através dos envidraçados, 18,8% são devidas às perdas através das paredes, 18,6% são devidas às perdas através dos pavimentos e 5,6% são devidas às perdas através da cobertura. Os ganhos solares do edifício são de $122,9\text{kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$.

Com a implementação da solução de reabilitação nZEB, na zona do jardim de infância, as necessidades energéticas de aquecimento reduzem $1,9\text{kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$ e de arrefecimento reduzem $0,3\text{kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$, em relação ao edifício ante da reabilitação. Anualmente, não se verifica uma redução significativa das perdas através da envolvente, devido ao aumento de isolamento térmico, para 8 cm, nas paredes exteriores do edifício e ao aumento de isolamento térmico, para 15cm, na cobertura, porque mais de metade das perdas são devidas aos envidraçados.

4.6.2. Desempenho termo-energético da zona do ensino básico – 1º ciclo

4.6.2.1. Desempenho térmico da zona do ensino básico – 1º ciclo

Na semana de 21 a 25 de janeiro, durante o período de ocupação do ensino básico – 1º ciclo, a temperatura interior varia de 13,1°C a 20,0°C. Durante a semana, a temperatura interior vai aumentando a partir das 08:00h, até atingir uma temperatura de 20°C pelas 10:00h, e entre as 10:00h e as 19:00h a temperatura interior mantém-se constante nos 20°C, devido à existência de sistema AVAC, em que a temperatura interior mínima, no inverno, é de 20°C e o período de funcionamento deste é entre as 08:00h e as 19:00h, nas salas de aulas do ensino básico – 1º ciclo (ver Figura 133).

Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, em comparação com o edifício sem qualquer solução de reabilitação, verifica-se um aumento da temperatura interior mínima de 0,5°C, na sala e aula $P_{1,10}$, e de 0,1°C na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, devido à aplicação de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores e ao aumento do isolamento térmico na cobertura, (na sala de aula $P_{0,2}$ a temperatura interior mante-se igual), e a temperatura interior máxima é de 20°C (temperatura mínima no inverno, considerada no sistema AVAC). Comparando em relação ao edifício com a implementação da solução de reabilitação, verifica-se que a aplicação de sistema de isolamento térmico contínuo, de 8cm, nas paredes exteriores, o aumento de 6cm para 16cm na cobertura e a instalação de uma pala de sombreamento na sala de aula $P_{1,10}$, a temperatura interior mínima das salas de aulas $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ aumenta, 0,2°C, 0,1°C respetivamente (na sala de aula $P_{0,2}$ a temperatura interior mantém-se igual), e a temperatura interior máxima é de 20°C.

Durante o período de ocupação, na semana mais fria, a temperatura operativa varia de 13,4°C (às 08:00h) a 19,9°C (às 12:00h). Nas salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$, os ocupantes encontram-se fora do intervalo de conforto, durante toda a semana, pois a temperatura operativa é inferior a 20°C (ver Figura 134).

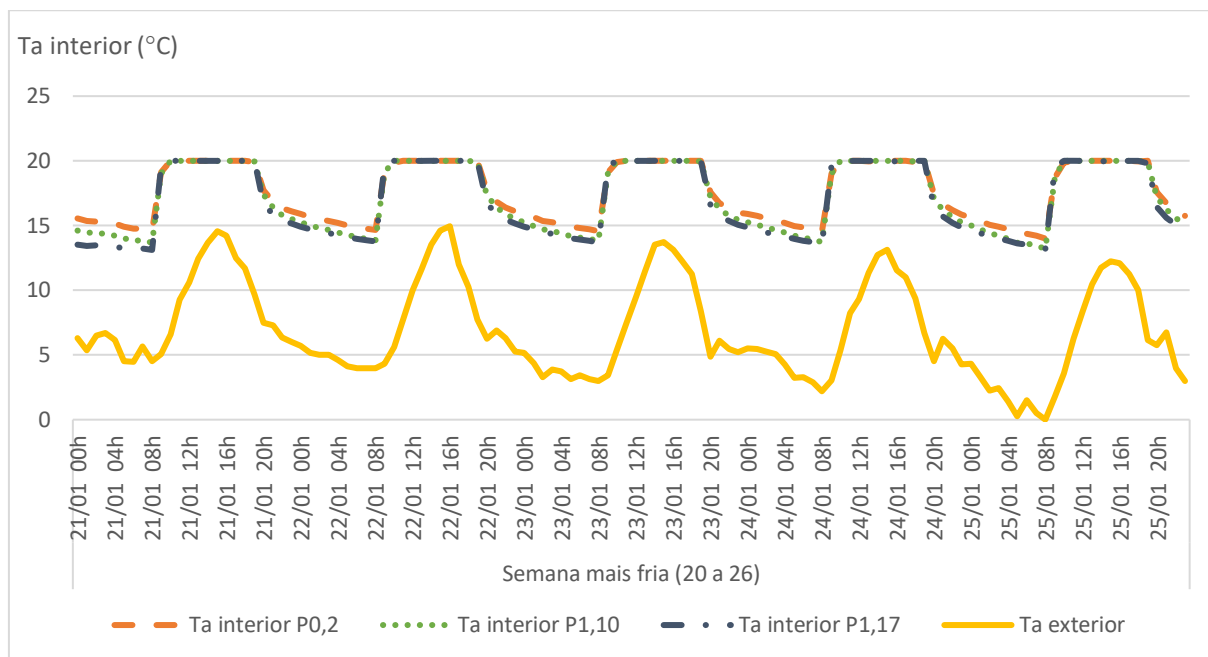


Figura 133 - Temperatura ambiente interior das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB

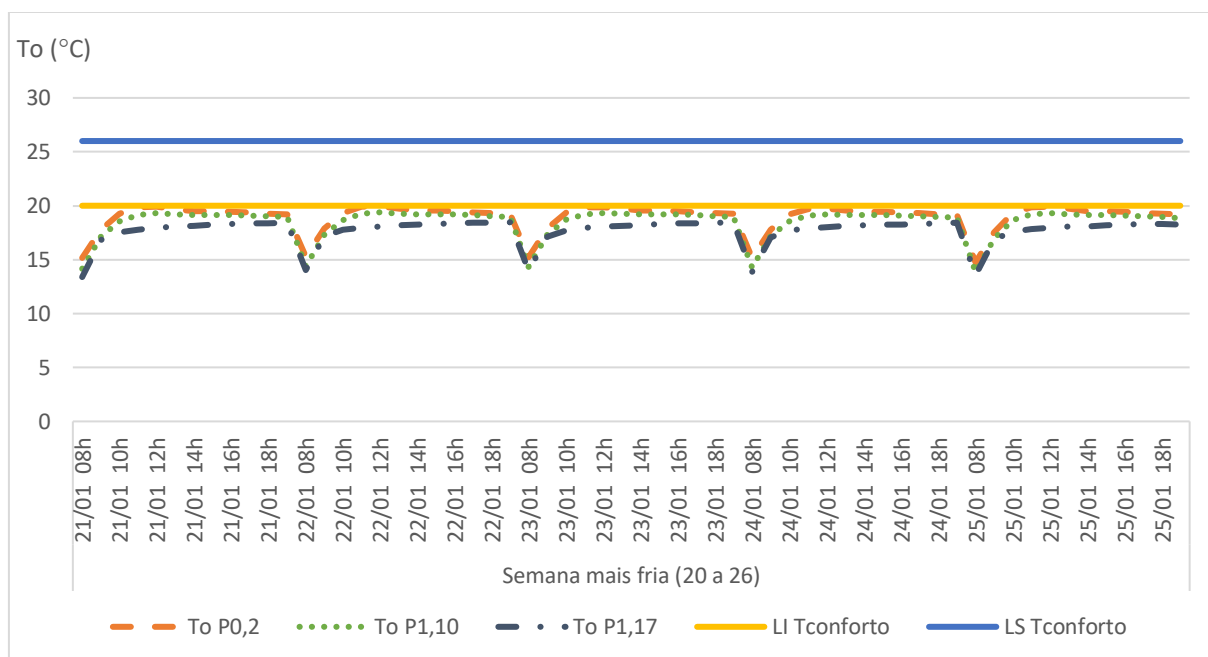


Figura 134 - Temperatura operativa das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para a semana mais fria no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB

Antes da solução de reabilitação, os ocupantes da sala de aula $P_{0,2}$, estavam em conforto das 11:00h às 12:00h nos dias 21, 22, 23 e 25 de janeiro, e os ocupantes da sala de aula $P_{1,10}$ e da sala de expressão plástica $P_{1,17}$, estavam em desconforto, com a implementação da solução de reabilitação nZEB, verifica-

se que os ocupantes da sala de aula $P_{0,2}$ passam a estar em desconforto, uma vez que o efeito da instalação da pala de sombreamento se sobrepõem ao efeito da aplicação do sistema de isolamento térmico contínuo pelo exterior, e os ocupantes da sala de aula $P_{1,10}$ e da sala de expressão plástica $P_{1,17}$, continuam em desconforto. Os ocupantes do edifício após a implementação da solução de reabilitação, nas três salas de aulas estavam em desconforto, e com a implementação da solução de reabilitação nZEB, verifica-se que os ocupantes continuam em situação de desconforto.

Durante o inverno, no dia 2 de janeiro, verifica-se que no período de ocupação do ensino básico – 1º ciclo, a temperatura interior varia de 12,3°C a 20,0°C. As salas de aulas $P_{0,2}$ e $P_{1,10}$ (orientadas a sudeste), têm temperatura interior superior à sala de aula $P_{1,17}$ (orientada a noroeste), devido aos ganhos solares, e a sala de aula $P_{0,2}$ tem temperatura interior superior à sala de aula $P_{1,10}$, devido às menores perdas de calor do interior para o exterior da sala de aula. O sistema AVAC, liga às 08:00h em que a temperatura interior vai aumentando gradualmente até que atinge uma temperatura de 20°C pelas 11:00h, na sala de aula $P_{1,17}$ e nas salas de aulas $P_{0,2}$ e $P_{1,10}$ atinge mais cedo, pelas 10:00h, mantendo as três salas de aulas a uma temperatura constante de 20°C, até às 19:00h, hora em que o sistema de climatização é desligado, começando a temperatura interior a diminuir novamente (20°C é a temperatura interior mínima considerada no sistema AVAC, no inverno) (ver Figura 135).

Comparando o edifício antes da reabilitação, com a implementação da solução de reabilitação nZEB, verifica-se que a temperatura interior mínima aumenta, 0,6°C na sala de aula $P_{1,10}$ e 0,3°C na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, devido ao maior efeito da aplicação de isolamento térmico contínuo, de 8cm, nas paredes exteriores e ao aumento do isolamento térmico da cobertura de 6cm para 16cm, em relação à palas de sombreamento instalada na sala de aula $P_{1,10}$ (na sala de aula $P_{0,2}$ a temperatura interior mantém-se igual), e a temperatura interior máxima é de 20°C.

Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, verifica-se que a temperatura interior mínima aumenta, 0,3°C na sala de aula $P_{1,10}$ e 0,2°C na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, devido ao maior efeito da aplicação de sistema de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores de 8cm e do aumento do isolamento térmico da cobertura de 6cm para 16cm, em relação à instalação de uma pala de sombreamento na sala de aula $P_{1,10}$ (na sala de aula $P_{0,2}$ a temperatura interior mantém-se igual), e a temperatura interior máxima é de 20°C, em relação à implementação da solução de reabilitação, no edifício.

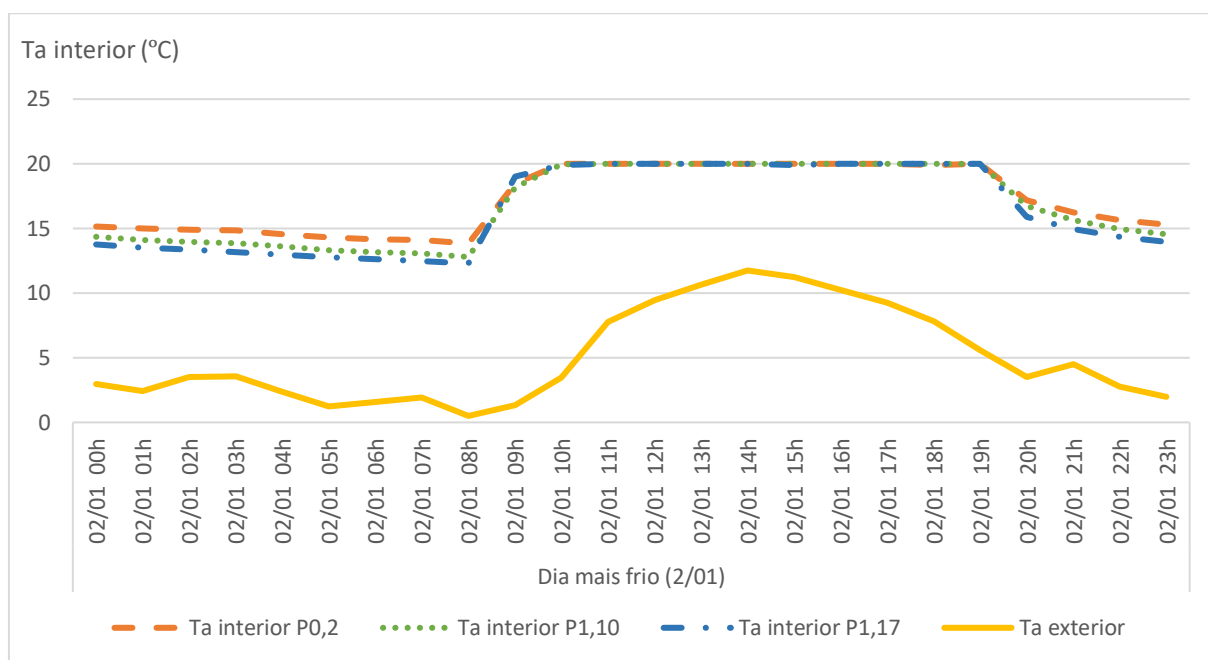


Figura 135 - Temperatura ambiente interior das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB

No dia mais frio, durante o período de ocupação do ensino básico – 1º ciclo, os ocupantes das três salas de aulas ($P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$) encontram-se fora do intervalo de conforto, pois a temperatura operativa é inferior a 20°C, contudo a temperatura operativa aumenta (varia de 12,6°C a 19,7°C) aproximando-se dos 20°C. Devido à existência de sistema AVAC, verifica-se que a temperatura operativa entre as 10:00h e as 19:00h manteve-se mais constante (varia pouco) (ver Figura 136).

Com a implementação da solução de reabilitação nZEB, verifica-se que as três salas de aulas continuam em desconforto, apesar da temperatura operativa se ter aproximado dos 20°C, em relação ao edifício antes da solução de reabilitação e com a implementação da solução de reabilitação proposta.

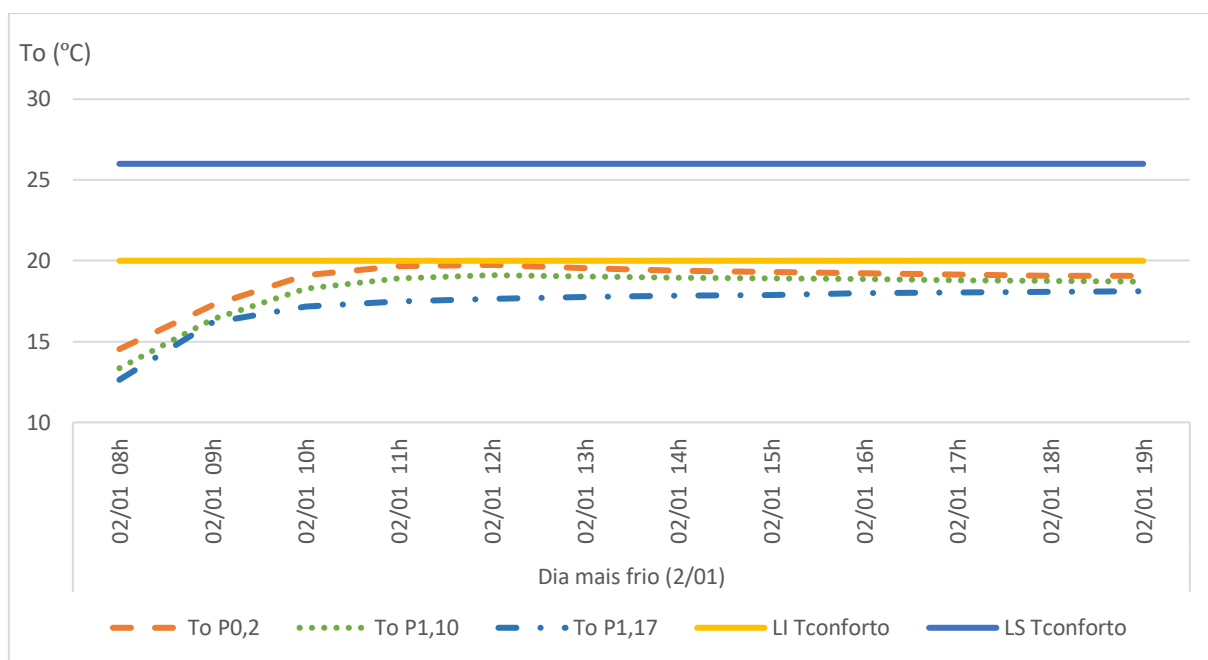


Figura 136 - Temperatura operativa das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para o dia mais frio no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB

Através da análise do conforto térmico, pelo método da zona de conforto (ASHRAE 55, 2017), para o dia mais frio, as temperaturas operativas das salas de aulas (piso 0 e piso 1) e a sala de expressão plástica $P_{1,17}$, do ensino básico – 1º ciclo, variam de 15,58°C a 17,24°C, tendo em conta que a taxa metabólica dos ocupantes é de 1,0met, o isolamento do vestuário no inverno de 1,0clo, a velocidade média do ar inferior a 0,1m/s e a humidade relativa de 55,80%, verifica-se que os ocupantes das salas de aulas (piso 0 e piso 1) e a sala de expressão plástica $P_{1,17}$, estão em desconforto (Figura 137).

No dia mais frio, os ocupantes das salas de aulas do piso 0, piso 1 e sala de expressão plásticas $P_{1,17}$, antes de reabilitação e com a implementação da solução de reabilitação, estavam em desconforto, e com a implementação da solução de reabilitação nZEB, continuam em desconforto, devido a perdas por radiação para o envidraçado.

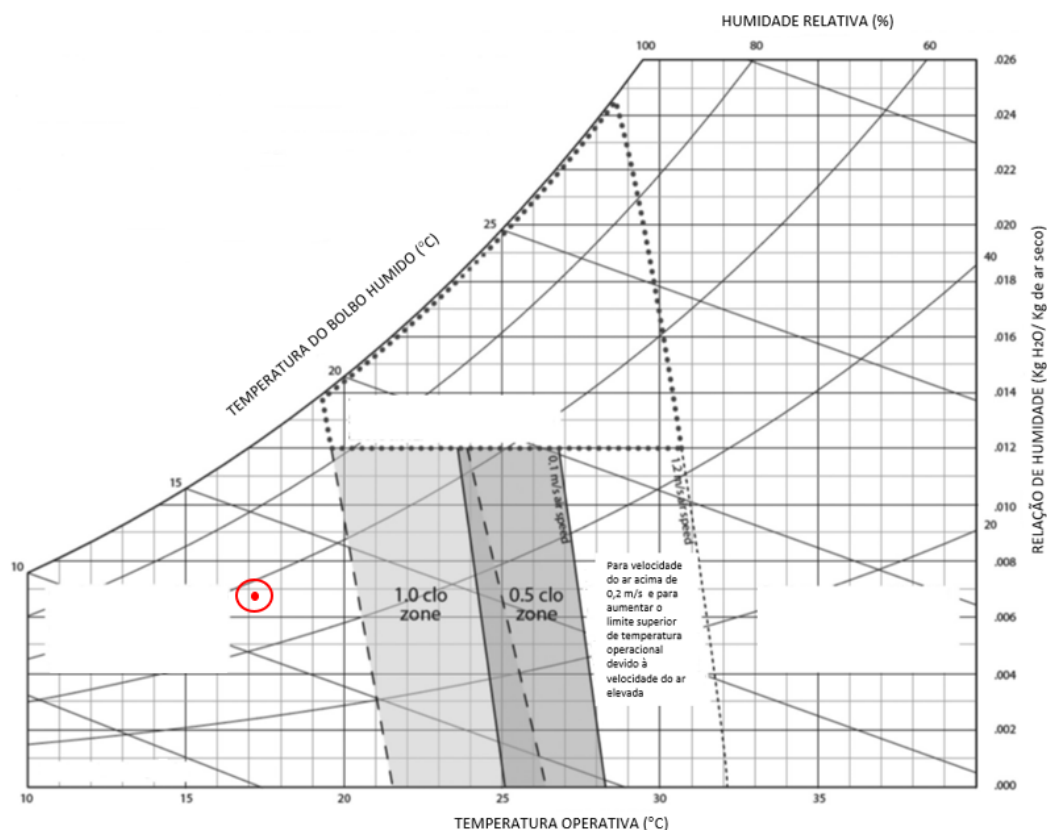


Figura 137 - Método da zona de conforto, para o dia mais frio no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica P_{1,17}, considerando a situação mais desfavorável (CBE Thermal Comfort Tool, 2019)

Na semana de 17 a 21 de junho, a temperatura interior varia de 20,8°C a 26°C, no período de ocupação do ensino básico – 1º ciclo. A temperatura interior da sala de aula P_{0,2}, varia de 22,0°C a 26,0°C, da sala de aula P_{0,2}, varia de 22,5°C a 26,0°C e a sala de expressão plástica P_{1,17}, varia de 20,8°C a 26,0°C. A sala de expressão plástica P_{1,17}, tem menor temperatura interior mínima que as salas de aulas P_{0,2} e P_{1,10}, porque não tem ganhos solares (orientada a noroeste), e a sala de aula P_{1,10}, tem maior temperatura interior mínima que a sala de aula P_{0,2}, pois tem maiores ganhos de calor através das paredes exteriores e da cobertura, e a temperatura interior máxima das três salas de aulas, é de 26°C, devido ao sistema AVAC (ver Figura 138).

Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, a temperatura interior mínima das três salas de aulas diminui, 1,4°C, 1,1°C e 0,1°C na sala de aula P_{0,2}, P_{1,10} e P_{1,17} respetivamente, devido à colocação de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores e ao aumento do isolamento térmico na cobertura, existindo uma maior diminuição da temperatura interior mínima nas salas de aulas P_{0,2} e P_{1,10} devido

também ao efeito das palas de sombreamento instaladas, em relação ao edifício antes da reabilitação. Comparando o edifício com a implementação da solução de reabilitação proposta e com a implementação da solução de reabilitação nZEB, verifica-se que a temperatura interior mínima das três salas de aulas diminui, $0,2^{\circ}\text{C}$ na sala de aula $P_{0,2}$, $0,9^{\circ}\text{C}$ na sala de aula $P_{1,10}$ e $0,1^{\circ}\text{C}$ na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, devido à aplicação de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores e ao aumento do isolamento térmico na cobertura, sendo que existe maior diminuição maior na sala de aula $P_{1,10}$, pois esta passa a ter pala de sombreamento, diminuindo os ganhos solares.

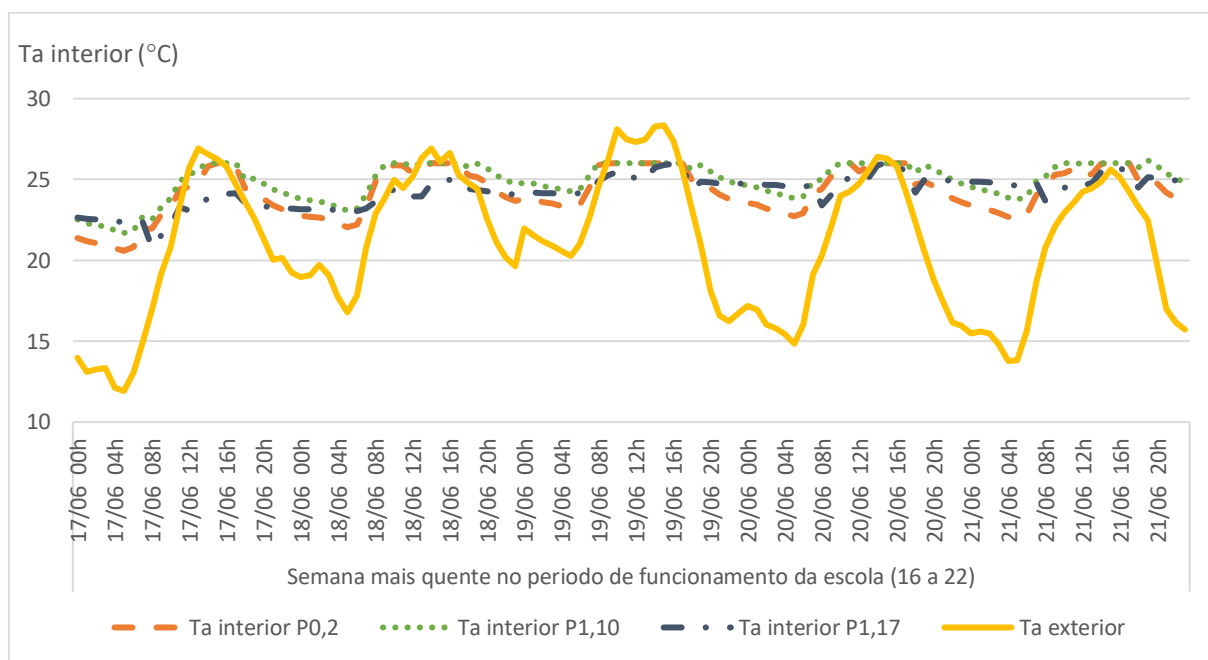


Figura 138 - Temperatura ambiente interior das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB

Durante o período de ocupação, na semana de 17 a 21 de junho, os ocupantes estão no intervalo de conforto, das 09:00h às 12:00h e das 14:00h às 17:00h no dia 19 de junho, das 11:00h às 12:00h e das 14:00h às 17:00h no dia 20 de junho e das 14:00h às 17:00h no dia 21 de junho, na sala de aula $P_{0,2}$, das 10:00h às 12:00h e das 14:00h às 19:00h no dia 18 de junho, das 8:00h às 12:00h e das 14:00h às 18:00h no dia 19 e 20 de junho, e das 9:00h às 12:00h e das 14:00h às 18:00h no dia 21 de junho, na sala de aula $P_{1,10}$. Os ocupantes da sala de expressão plástica $P_{1,17}$, durante toda a semana, não estão no intervalo de conforto (ver Figura 139).

Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, os ocupantes das salas de aulas $P_{0,2}$ e $P_{1,10}$, passam a estar confortáveis mais 49 horas na semana, em relação ao edifício antes da reabilitação, e passam a estar confortáveis mais 59 horas na semana, em relação ao edifício com a implementação da

solução de reabilitação. Os ocupantes da sala de expressão plástica $P_{1,17}$ estão em conforto, no edifício antes da reabilitação, com a implementação da solução de reabilitação proposta e com a solução de reabilitação nZEB.

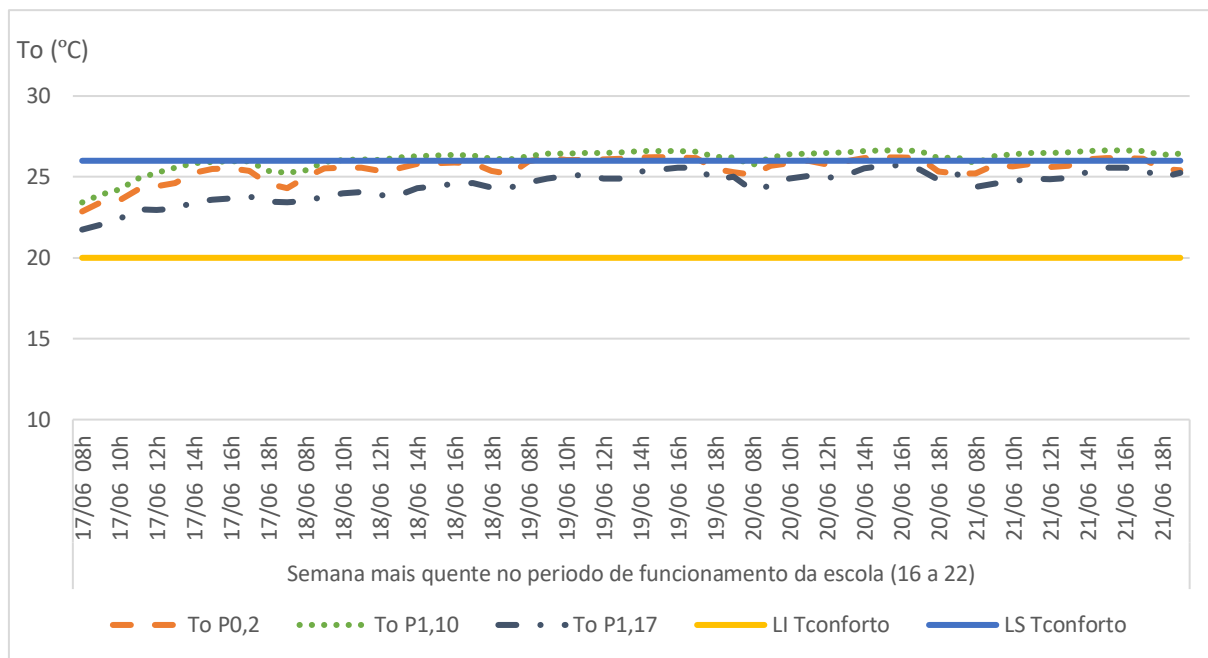


Figura 139 - Temperatura operativa das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para a semana mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB

No dia mais quente (19 de junho), durante o período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, a temperatura exterior varia de 20,9°C a 28,4°C, e a temperatura interior varia de 24,4°C a 26,0°C. A temperatura interior mínima das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$, são de 25,0°C, 25,6°C e 24,4°C, respetivamente, a sala de expressão plástica $P_{1,17}$, tem menor temperatura interior mínima que as salas de aulas $P_{0,2}$ e $P_{1,10}$, porque não tem ganhos solares (orientada a noroeste), e a sala de aula $P_{1,10}$, tem maior temperatura interior mínima que a sala de aula $P_{0,2}$, pois tem maiores ganhos de calor através das paredes exteriores e da cobertura, e a temperatura interior máxima das três salas de aulas, é de 26°C, devido ao sistema AVAC (ver Figura 140).

Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, a temperatura interior mínima das três salas de aulas diminui, 0,9°C, 0,4°C e 0,2°C na sala de aula $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ respetivamente, devido à colocação de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores e ao aumento do isolamento térmico na cobertura, existindo uma maior diminuição na sala de aula $P_{0,2}$ devido também ao efeito da instalação de uma pala de sombreamento e à menor transferência de calor para o espaço (menor área de parede exterior), comparativamente ao edifício antes da reabilitação. Comparando o edifício com a implementação da

solução de reabilitação e com a implementação da solução de reabilitação nZEB, verifica-se que a temperatura interior das três salas de aulas diminui, $0,1^{\circ}\text{C}$ na sala de aula $P_{0,2}$, $0,2^{\circ}\text{C}$ na sala de aula $P_{1,10}$ e $0,1^{\circ}\text{C}$ na sala de expressão plástica $P_{1,17}$, devido à aplicação de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores e ao aumento do isolamento térmico na cobertura, sendo que existe maior diminuição na sala de aula $P_{1,10}$, pois esta passa a ter pala de sombreamento, diminuindo os ganhos solares.

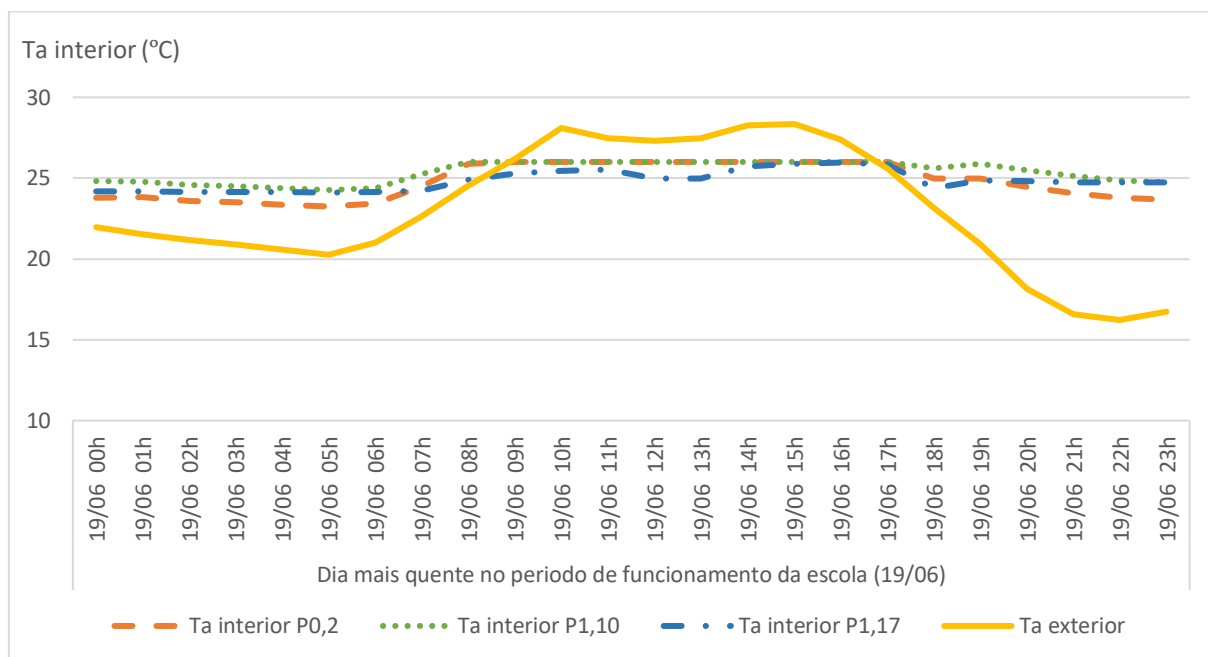


Figura 140 - Temperatura ambiente interior das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB

Durante o período de ocupação do ensino básico – 1º ciclo, no dia 19 de junho, a temperatura operativa varia de $24,7^{\circ}\text{C}$ a $26,6^{\circ}\text{C}$. Os ocupantes da sala de expressão plástica $P_{1,17}$ estão no intervalo de conforto (temperatura operativa entre 20°C e 26°C), enquanto que os ocupantes da sala de aula $P_{1,10}$ não estão no intervalo de conforto (temperatura operativa superior a 26°C), durante todo o dia. Na sala de aula $P_{0,2}$, os seus ocupantes só estão em conforto das 18:00h às 19:00h (ver Figura 141).

Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, verifica-se que a temperatura operativa das salas de aulas $P_{0,2}$ e $P_{1,10}$ diminui, aproximando-se de uma situação de conforto, contudo apenas os ocupantes da sala de aula $P_{0,2}$ passam a estar em conforto das 18:00h às 19:00h, e os ocupantes da sala de expressão plástica $P_{1,17}$ continuam em conforto, em relação ao edifício antes da reabilitação e com a implementação de uma solução de reabilitação.

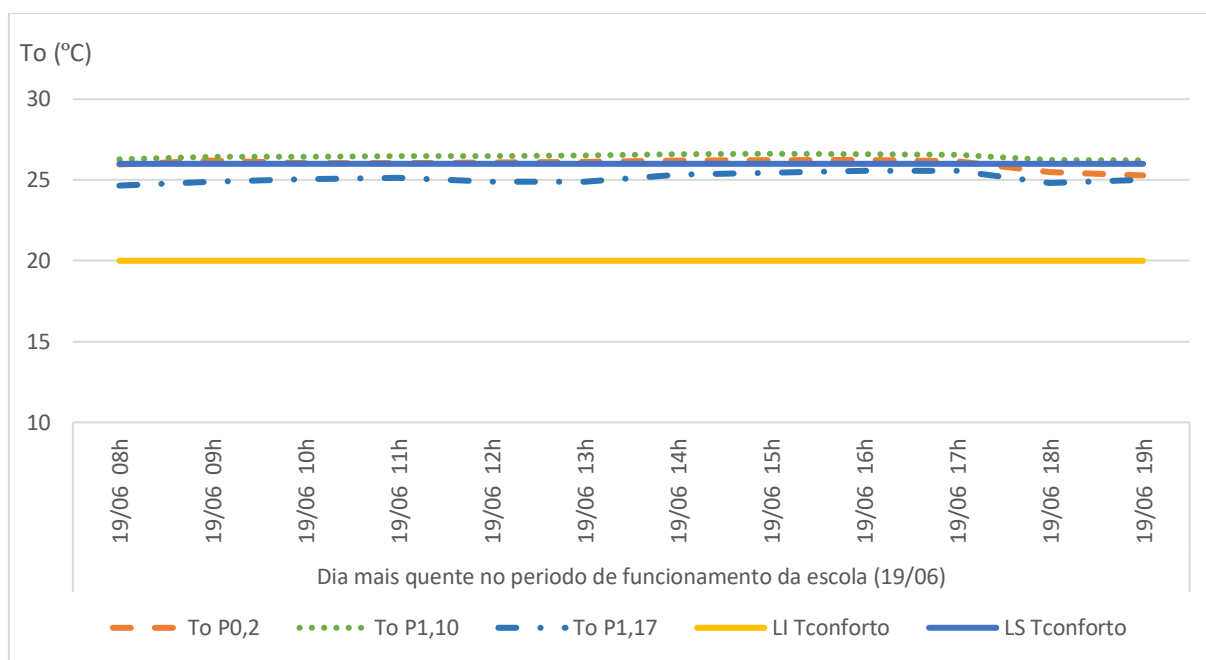


Figura 141 - Temperatura operativa das salas de aulas $P_{0,2}$, $P_{1,10}$ e $P_{1,17}$ para o dia mais quente no período de funcionamento da escola no ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB

Através da análise do conforto térmico, pelo método da zona de conforto (ASHRAE 55, 2017), para o dia 19 de junho, as temperaturas operativas das salas de aulas (piso 0 e piso 1) e a sala de expressão plástica $P_{1,17}$, do ensino básico – 1º ciclo, variam de 24,78°C a 25,79°C, tendo em conta que a taxa metabólica dos ocupantes é de 1,0met, o isolamento do vestuário no verão de 0,5clo, a velocidade média do ar inferior a 0,1m/s e a humidade relativa de 55,80%, verifica-se que os ocupantes das salas de aulas (piso 0 e piso 1) e a sala de expressão plástica $P_{1,17}$, estão em conforto (ver Figura 142).

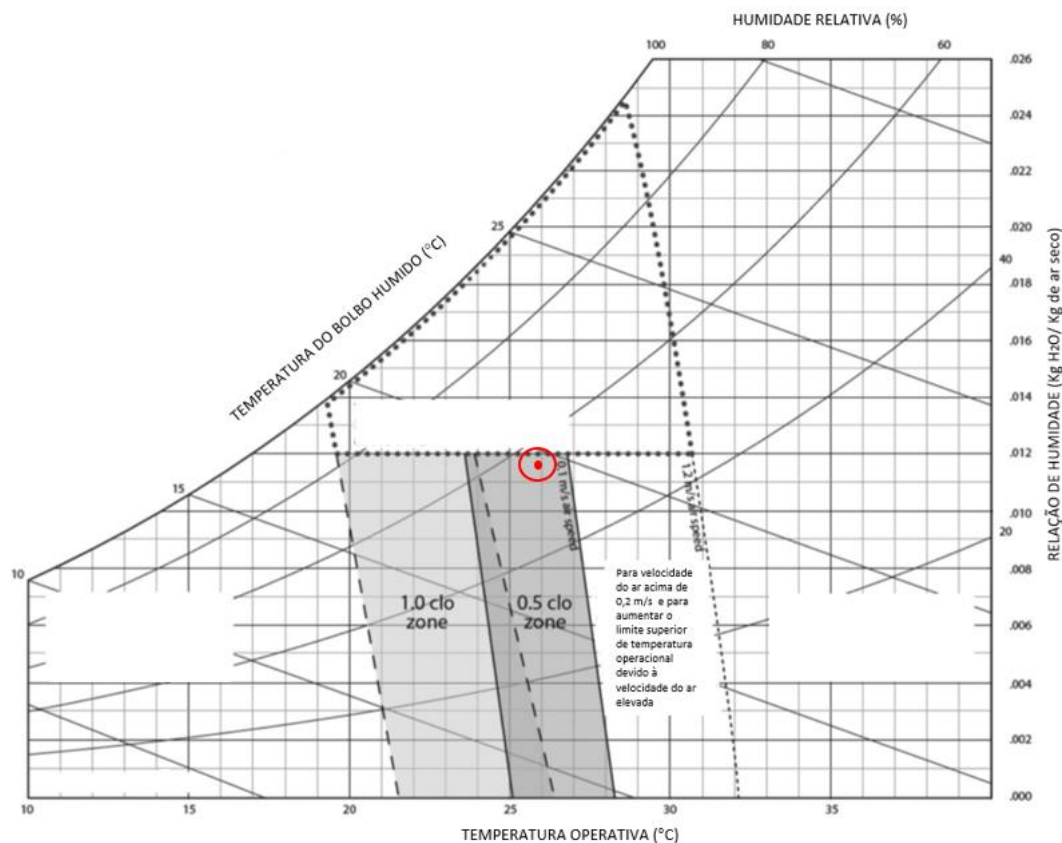


Figura 142 - Método da zona de conforto, para o dia mais quente no período de ocupação da zona do ensino básico – 1º ciclo, nas salas de aulas (piso 0 e piso 1) e na sala de expressão plástica P_{1,17}, considerando a situação mais desfavorável (CBE Thermal Comfort Tool, 2019)

Antes da reabilitação, apenas os ocupantes da sala de aula P_{0,3} e a sala de expressão plástica P_{1,17} estavam em conforto, com a aplicação de isolamento térmico contínuo pelo exterior nas paredes, ao aumento do isolamento térmico na cobertura e a instalação de palas de sombreamento nas salas de aulas do piso 0 e no piso 1, os ocupantes das salas de aulas que estavam em desconforto, passam a estar em conforto, e a sala de aula P_{0,3} e a sala de expressão plástica P_{1,17} continuam em conforto.

Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, a sala de aula P_{1,8} e P_{1,9} estavam em desconforto e passam a estar em conforto, devido ao aumento do isolamento térmico pelo exterior nas paredes e na cobertura, e à instalação de palas de sombreamento no piso 1. As restantes salas de aulas do ensino básico – 1º ciclo, estavam em conforto e continuam em conforto, em relação ao edifício com a implementação da solução de reabilitação.

4.6.2.2. Necessidade de aquecimento e arrefecimento da zona do ensino básico – 1º ciclo

Anualmente as necessidades energéticas relativas ao aquecimento da zona do ensino básico – 1º ciclo são de 26,1kWh/m². Os meses com necessidades de aquecimento estão compreendidos entre outubro e maio, sendo o mês de janeiro o mais frio, logo é o que apresenta maior necessidades de aquecimento, com um valor de 5,3kWh/m². Anualmente as necessidades energéticas respetivas ao arrefecimento da zona do ensino básico – 1º ciclo são de 0,3kWh/m². Existem necessidades de arrefecimento no mês de junho e setembro, com valores de 0,2kWh/m² e 0,1kWh/m². O mês de julho e agosto que não apresenta necessidades de arrefecimento, devido a zona do ensino básico – 1º ciclo se encontrar encerrado (ver Figura 143).

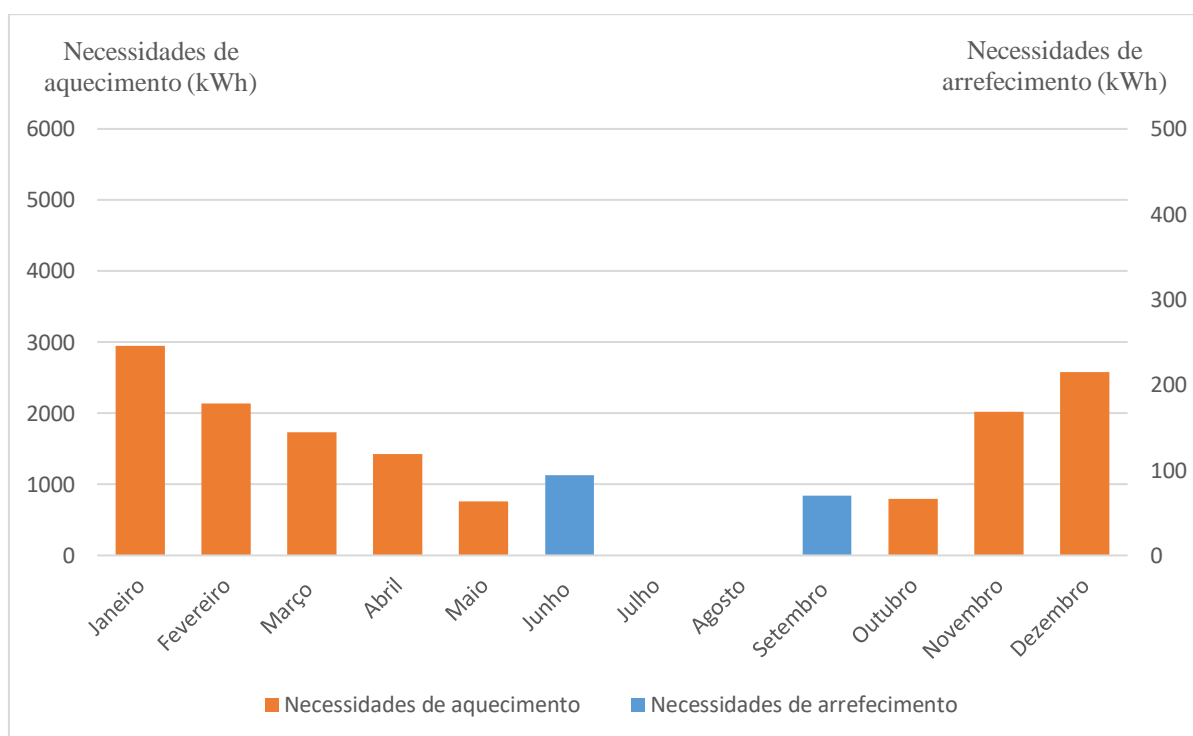


Figura 143 - Necessidades de arrefecimento por mês da zona do ensino básico – 1º ciclo – solução nZEB

As perdas através da envolvente, na zona do ensino básico – 1º ciclo, são de 81,4kWh/m².ano, das quais 47,5% são devidas às perdas através do envidraçados, 24,2% são devidas às perdas através das paredes, 19,1% são devidas às perdas através dos pavimentos e 9,3% são devidas às perdas através da cobertura. Os ganhos solares do edifício são de 65,9kWh/m².ano.

Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, na zona do ensino básico – 1º ciclo, verifica-se uma redução das necessidades energéticas de aquecimento, de 2,8kWh/m².ano, e das necessidades energéticas de arrefecimento de 0,2kWh/m².ano, relativamente ao edifício sem qualquer solução de reabilitação, e uma redução das necessidades energéticas de aquecimento, de 1,3kWh/m².ano, e das necessidades energéticas de arrefecimento de 0,2kWh/m².ano, relativamente ao edifício com a implementação da solução de reabilitação.

A redução das necessidades energéticas, anualmente, deve-se à redução, de 25,3%, das perdas através da envolvente, devido à colocação de sistema de isolamento térmico contínuo de 8 cm nas paredes exteriores e ao aumento do isolamento térmico de 6cm para 16cm na cobertura inclinada na zona ensino básico – 1º ciclo. Os ganhos solares também reduzem, 22,9%, ao ano, devido à colocação de palas de sombreamento nas salas de aulas do piso 0, em relação ao edifício sem qualquer solução de reabilitação. Durante o ano, existe também uma redução, de 9,5%, das perdas através da envolvente, devido à aplicação do sistema de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores e ao aumento do isolamento térmico na cobertura inclinada na zona ensino básico – 1º ciclo. Os ganhos solares também reduzem, 8,1%, ao ano, devido à colocação de palas de sombreamento nas salas de aulas do piso 1, em relação ao edifício com a implementação da solução de reabilitação.

4.6.3. Necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício

As necessidades energéticas totais do edifício são de 28,9kWh/m².ano, sendo 28,4kWh/m².ano relativas ao aquecimento e 0,5kWh/m².ano devidas a arrefecimento. A zona do ensino básico – 1º ciclo representa 64,5% das necessidades de aquecimento e 37,9% das necessidades de arrefecimento, e a zona do jardim de infância representa 35,5% das necessidades de aquecimento e 62,1% das necessidades de arrefecimento (ver Figura 144).

As perdas através da envolvente, na zona do ensino básico – 1º ciclo, são de 68,9kWh/m².ano, das quais 56,8% são devidas às perdas através do envidraçados, 16,4% são devidas às perdas através das paredes, 19,1% são devidas às perdas através dos pavimentos e 7,7% são devidas às perdas através da cobertura. Os ganhos solares do edifício são de 68,5kWh/m².ano.

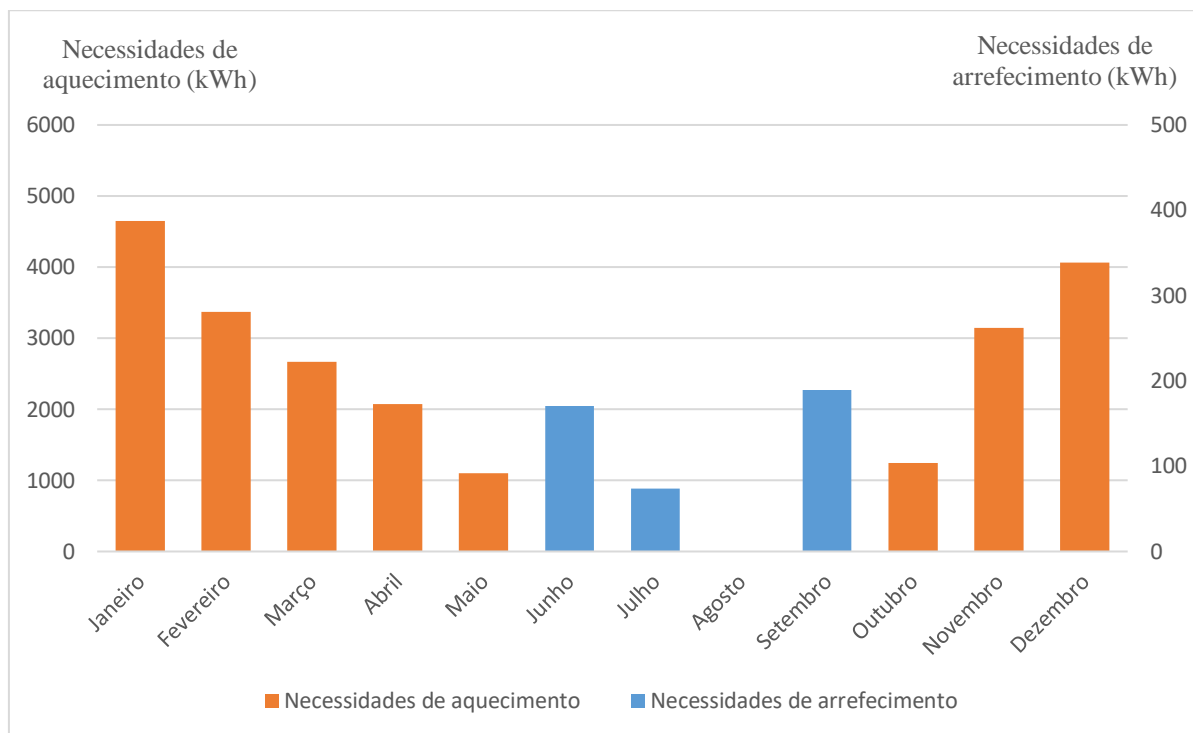


Figura 144 - Necessidades de arrefecimento por mês do edifício – solução nZEB

As necessidades totais do edifício, após a implementação da solução de reabilitação para atingir um edifício nZEB, reduzem 1,5kWh/m².ano (1,4Wh/m².ano relativas ao aquecimento e 0,1Wh/m².ano devidas a arrefecimento), em relação ao edifício com a solução de reabilitação implementada. As necessidades do edifício diminuem 4,8% (4,6% para as necessidades de aquecimento e 14,4% para as necessidades de arrefecimento). As necessidades energéticas de aquecimento da zona do ensino básico – 1º ciclo diminuí 4,7% e as necessidades energéticas de arrefecimento 36,3%. As necessidades totais do edifício, reduziram 3,2kWh/m².ano (2,5Wh/m².ano para as necessidades energéticas de aquecimento e 0,7Wh/m².ano para as necessidades energéticas de arrefecimento), em relação ao edifício sem qualquer solução de reabilitação.

As necessidades energéticas do edifício diminuem 9,8% (8,2% para as necessidades de aquecimento e 52,0% para as necessidades de arrefecimento). As necessidades de aquecimento da zona do ensino básico – 1º ciclo diminuí 9,7% e as necessidades de arrefecimento 70,1%. No caso da zona do jardim de infância as necessidades de aquecimento diminuiriam 5,7% e as necessidades de arrefecimento 23,9%.

Durante o ano, a redução das necessidades energéticas, deve-se à redução, de 42,1%, das perdas através da envolvente, devido à colocação de sistema de isolamento térmico contínuo pelo exterior com 8 cm de

isolamento nas paredes exteriores na zona ensino básico – 1º ciclo, ao aumento do isolamento térmico para 8cm nas paredes exteriores do jardim de infância, ao aumento do isolamento térmico para 15cm e para 16cm na cobertura plana (jardim de infância) e na cobertura inclinada (ensino básico – 1º ciclo) respetivamente. Anualmente, os ganhos solares reduzem, 34,7% (36,4% no verão e 33% no inverno), devido à colocação de palas de sombreamento nas salas de aulas do piso 0 e do piso 1, em relação ao edifício sem qualquer solução de reabilitação. A colocação de palas de sombreamento afeta os ganhos solares no inverno, contudo para manter a imagem do edifício foram instaladas palas com as mesmas características das existentes. Anualmente, existe também uma redução, de 8,5%, das perdas através da envolvente, devido à colocação de isolamento térmico contínuo de 8cm nas paredes exteriores na zona do ensino básico - 1º ciclo, ao aumento do isolamento térmico para 8 cm nas paredes exteriores da zona do jardim de infância e ao aumento do isolamento térmico (15cm e 16cm na cobertura plana (ensino básico – 1º ciclo) e na cobertura inclinada (jardim de infância) respetivamente). Durante o ano, os ganhos solares reduziram, 6,3% (6,1% no verão e 7,0% no inverno), devido à colocação de palas de sombreamento nas salas de aulas do piso 1, em relação ao edifício com a implementação da solução de reabilitação.

A instalação das palas de sombreamento nas salas de aulas do ensino primário conduziu a uma redução ligeira dos ganhos solares durante o inverno, o que é desfavorável em termos de desempenho térmico do edifício. No entanto evitam a incidência da radiação solar direta nos alunos (reduzindo problemas de desconforto devido à incidência direta da radiação solar) e superfícies das salas de aula, contribuindo também para a redução dos problemas de encadeamento.

4.6.4. Necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício com integração de painéis fotovoltaicos

Para calcular a produção mensal de um sistema solar fotovoltaico, utilizou-se a ferramenta informática PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), tendo em conta os dados padrão de um painel fotovoltaico, ou seja, as dimensões do painel são de $1,700 \times 1,016 \text{ m}^2$ (com 60 células), as células fotovoltaicas são de silício cristalino. O painel tem uma eficiência energética (do módulo) de 22%, está integrado no edifício, tem uma inclinação de 35° e está orientado a sul. A análise foi realizada, considerando o edifício localizado no Porto (Pedras Rubras, latitude de $41,23^\circ$ e longitude de $-8,68^\circ$). Para atingir o nível de um edifício nZEB, ou seja, com uma redução das necessidades energéticas, igual

ou superior a 75%, em relação ao edifício sem qualquer solução de reabilitação, são necessários 62 painéis fotovoltaicos (um painel fotovoltaico produz 618kWh.ano).

As necessidades energéticas do edifício com integração de painéis fotovoltaicos para aquecimento são de 7,9kWh/m².ano. O mês de janeiro é o mais frio, logo é o que tem maior necessidades de aquecimento, com 3,3kWh/m². No verão, os painéis fotovoltaicos produzem mais energia, sendo que nesses meses as necessidades de arrefecimento são asseguradas totalmente pelos painéis, no inverno, as necessidades de aquecimento também são reduzidas totalmente, nos meses de março, abril, maio e outubro (ver Figura 145). A energia excedente produzida pelos painéis fotovoltaicos, não utilizada no edifício, de março a outubro, é de 27,7kWh/m².ano (0,9kWh/m².ano no mês de março, 1,9kWh/m².ano no mês de abril, 3,6kWh/m².ano no mês de maio, 4,7kWh/m².ano no mês de junho, 5,0kWh/m².ano no mês de julho, 5,1kWh/m².ano no mês de agosto, 4,3kWh/m².ano no mês de setembro, 2,2kWh/m².ano no mês de outubro) (Figura 146), pode ser utilizada para reduzir a conta energética de edifícios localizados nas proximidades, visto tratar-se de uma zona socioeconómica mais desfavorecida e outra possibilidade seria recorrer ao armazenamento da energia através de baterias.

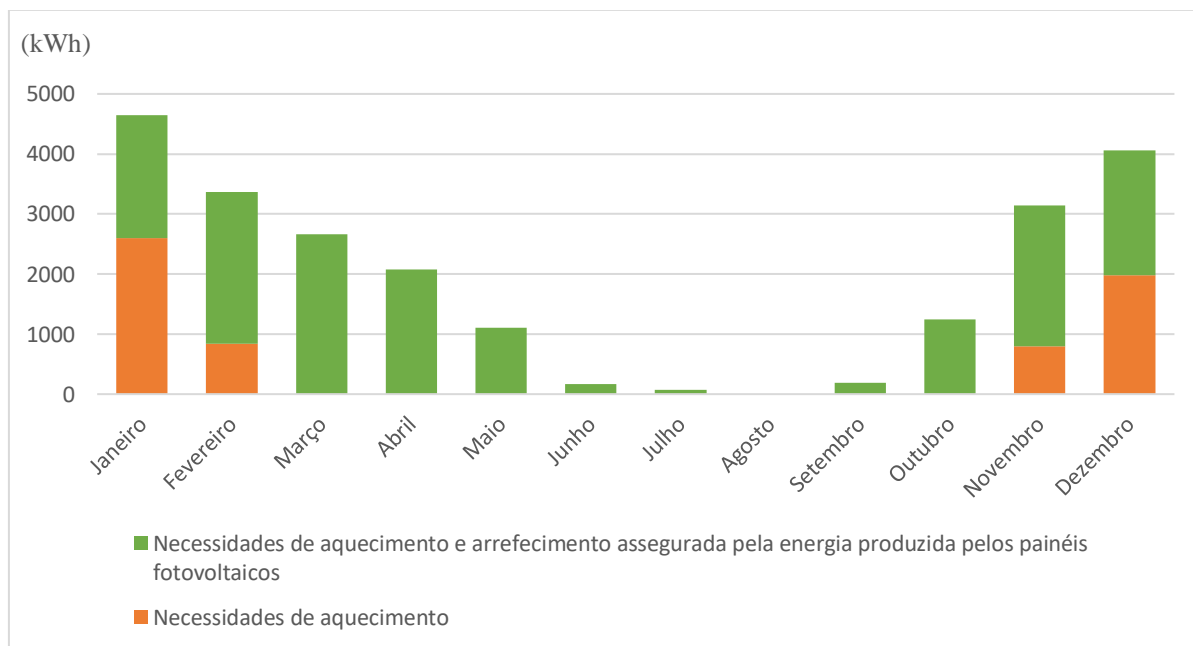


Figura 145 - Necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício asseguradas pela energia produzida pelos painéis fotovoltaicos – solução nZEB

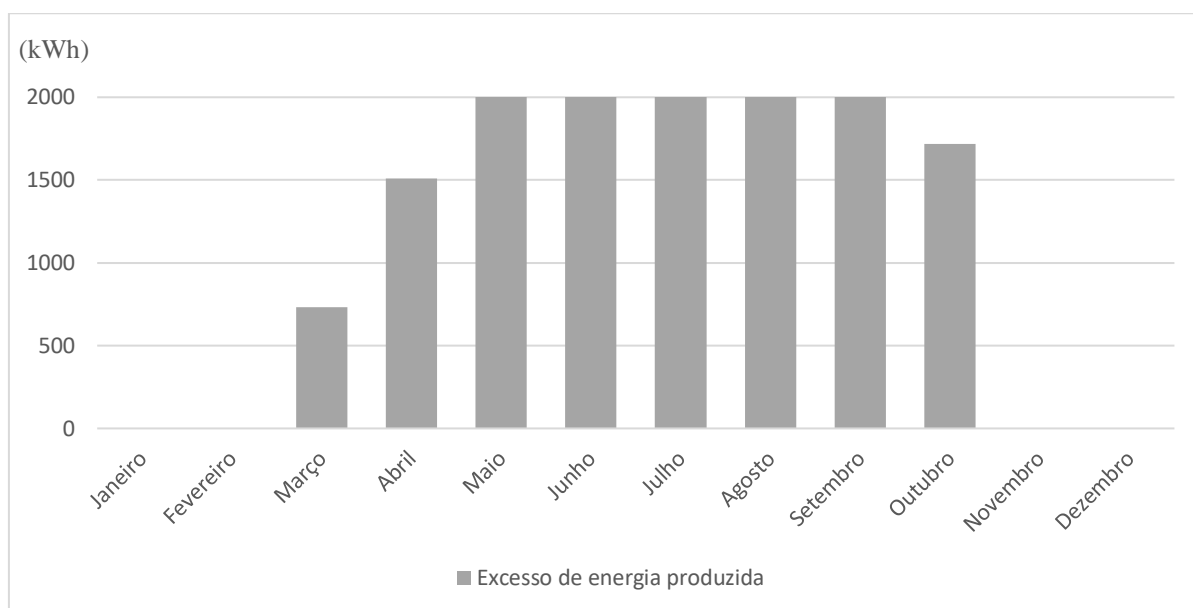


Figura 146 – Energia excedente produzida pelos painéis fotovoltaicos - solução nZEB

As necessidades energéticas totais do edifício, após a implementação da solução de reabilitação nZEB com integração de painéis fotovoltaicos, foram reduzidas em $24,2 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$, em relação ao edifício com a solução de reabilitação implementada. As necessidades do edifício diminuem 74,0%. As necessidades energéticas totais do edifício, foram reduzidas em $22,5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$, em relação ao edifício sem qualquer solução de reabilitação. As necessidades do edifício diminuem 75,3%.

4.7. Custos

A solução de reabilitação implementada no edifício, consistiu na colocação de um sistema de isolamento contínuo pelo exterior (4cm/6cm) e três palas de sombreamento nas salas de aulas do piso 0 ($P_{0,1}$, $P_{0,2}$ e $P_{0,3}$), na zona do ensino básico – 1º ciclo. A solução de reabilitação nZEB, corresponde ao aumento do isolamento térmico na cobertura plana (15cm) na zona do jardim de infância, ao aumento do isolamento térmico na cobertura inclinada (16cm) e mais três palas, de sombreamento nas salas de aulas do piso 1 ($P_{1,8}$, $P_{1,9}$ e $P_{1,10}$) na zona do ensino básico – 1º ciclo, ao do isolamento térmico nas paredes exteriores (8cm) na zona do jardim de infância e colocação de isolamento térmico contínuo nas paredes exteriores (8cm) na zona do ensino básico – 1º ciclo.

A solução de reabilitação implementada tem um custo total de 42962,95€, a solução de reabilitação nZEB (sistemas passivos) tem um custo total de 186244,92€ e a solução de reabilitação nZEB (sistemas passivos e sistemas ativos) tem um custo total de 219414,92€. O aumento de custos da solução de

reabilitação implementada relativamente à solução de reabilitação nZEB (sistemas passivos e sistemas ativos) é de 176451,97€, ou seja, 80,4%, com um período de retorno do investimento adicional de 29 anos. Na Tabela 13, estão representados os custos totais da solução de reabilitação implementada e da solução de reabilitação nZEB, com sistemas passivos e com sistemas passivos (isolamento e sombreamento da envolvente) e ativos (painéis fotovoltaicos).

Tabela 13 - Custo total da solução de reabilitação, solução de reabilitação para atingir um edifício nZEB (sistemas passivos e sistemas passivo mais sistemas ativos)

Solução de reabilitação implementada				
Tipo de solução	Área de intervenção [m²]/Nº de elementos [-]	Custo por m² [€/m²]/Custo por elemento [€/el.]	Custo total do tipo de solução [€]	Custo da solução de reabilitação [€]
Sistema de isolamento contínuo pelo exterior (4cm)	285,35	61,65	17591,82	42962,95
Sistema de isolamento contínuo pelo exterior (6cm)	379,78	65,82	24997,12	
Palas de sombreamento (piso 0)	3	124,67	374,01	
Solução de reabilitação para atingir um edifício nZEB (sistemas passivos)				
Isolamento térmico nas paredes exteriores (8cm)	800,80	71,29	57089,03	186244,92
Isolamento térmico na cobertura inclinada (16cm)	676,32	129,48	87569,91	
Isolamento térmico na cobertura plana (15cm)	571,80	71,42	40837,96	
Palas de sombreamento (piso 0 e piso 1)	6	124,67	748,02	
Solução de reabilitação para atingir um edifício nZEB (sistemas ativos)				
Painel fotovoltaico	62	535	33170	219414,92

A intervenção que teve maior contributo para os custos de investimento da solução de reabilitação nZEB, foi a aplicação de isolamento térmico na cobertura inclinada, com um custo de 87569,91€. A solução de reabilitação nZEB, tem um custo de 219414,92€ e reduz as necessidades energéticas do edifício 75,3%, a solução de reabilitação implementada, tem um custo de 42962,95€ e reduz as necessidades energéticas do edifício 5,2%, sendo que a solução de reabilitação implementada é menos eficaz que a solução de reabilitação nZEB, tendo em conta que o período de retorno do investimento adicional é de 29 anos.

5. CONCLUSÃO

Com o aumento das exigências sociais relativamente à qualidade de vida, sobretudo em países em desenvolvimento, a concentração atual de CO₂ na atmosfera é uma real ameaça à estabilidade e equilíbrio do planeta, tornando-se fundamental reduzir os consumos energéticos e promover o consumo de energias alternativas de origem renovável, de modo a reduzir as emissões de gases de efeito de estufa.

O setor dos edifícios é responsável por cerca de 40% do consumo total de energia e 36% das emissões de CO₂ na Europa, logo é um dos setores com mais potencial de poupança energética e na redução da emissão de CO₂.

Em Portugal, o setor dos edifícios de serviços é responsável por 12,2% do consumo total de energia, em 2017, pelo que alguns municípios têm vindo a realizar intervenções de melhoria da eficiência energética nos edifícios públicos, principalmente no parque escolar, de modo a melhorar as condições de conforto dos utilizadores e contribuir para a redução das despesas assumidas pelos órgãos governativos. Além disso visto a qualidade do ar interior e o nível de conforto nas escolas, onde os alunos passam maioritariamente o seu tempo, é frequentemente inadequado, podendo ter consequências significativas a nível da aprendizagem, pelo que é necessário intervir para as assegurar.

Neste trabalho foram estudadas soluções de reabilitação, visando a melhoria da eficiência energética, de um edifício escolar, bem como verificar se as soluções estudadas são as adequadas para tornar o edifício num nZEB. Neste sentido, foi selecionada uma escola, que se encontrava em fase de reabilitação, visto ser um edifício com elevados requisitos de conforto e de consumo de energia. Além da análise das soluções de reabilitação implementadas no edifício foi proposta uma solução de reabilitação que o convertesse num edifício nZEB. A análise do desempenho do edifício foi realizada através de simulação dinâmica (usando o DesignBuilder), sendo avaliado o impacto das medidas de reabilitação implementadas no comportamento termo-energético do mesmo. Foram também analisadas as condições de conforto térmico nas salas de aulas, utilizado o modelo de conforto térmico adaptativo (sem climatização), e o método da zona de conforto (com climatização), definido na norma ASHRAE 55 de 2017, de modo a verificar o impacto da reabilitação proposta nas condições de conforto térmico dos

alunos. Esta análise termo-energética foi realizada para a situação mais desfavorável, ou seja, para o dia mais frio e para o dia mais quente, e para a semana mais fria e mais quente, no período de ocupação.

O edifício estudado é constituído por duas partes, uma sem isolamento térmico na envolvente (ensino básico – 1º ciclo), que foi alvo de reabilitação e uma parte com isolamento na envolvente, que não foi alvo de intervenção (jardim de infância). A solução definida para a reabilitação do edifício foi um sistema de isolamento térmico contínuo pelo exterior (4 cm e revestimento em granito na zona inferior da parede e 6 cm rebocada nas restantes zonas). Foram também instaladas palas para sombreamento nas salas de aulas do piso 0.

A análise das condições ambientais do espaço, sem climatização, no dia mais frio, não pode ser realizada, porque o valor da temperatura exterior média mensal é inferior a 9,4°C, no dia mais quente, verificou-se que, o edifício apresenta condições de conforto nas salas de aula do jardim de infância, mas no do ensino básico – 1º ciclo apenas a sala de expressão plástica existem situações de conforto (salas de aulas do piso 0 e do piso 1 estão em desconforto). A análise das condições ambientais do espaço, com climatização, no dia mais frio, permitiu verificar que, o edifício não apresenta condições de conforto nas salas de aulas das duas zonas, devido a perdas por radiação para o envidraçado, no dia mais quente, o edifício apresenta condições de conforto nas salas de aula do jardim de infância ($J_{0,1}$ e $J_{0,3}$), e nas salas de do ensino básico – 1º ciclo ($P_{0,3}$ e $P_{1,17}$).

Com a implementação da solução de reabilitação implementada (no ensino básico – 1º ciclo) as condições de conforto térmico das salas de aulas do piso 0, sem climatização, passam a estar em conforto, no verão. As condições térmicas nas salas de aulas, com climatização, no dia mais frio, continuam a não assegurar as condições de conforto térmico, devido a perdas por radiação para o envidraçado, mas no dia mais quente, as condições térmicas nas salas de aulas $P_{0,1}$, $P_{0,2}$ e $P_{1,10}$, passam a assegurar as condições de conforto térmico e as condições térmicas nas salas de aulas $P_{0,3}$ e $P_{1,17}$ continuam a assegurar as condições de conforto térmico.

A solução de reabilitação implementada permitiu reduzir as necessidades energéticas de aquecimento do edifício em 3,7% e as necessidades de arrefecimento em 43,6%, 5,2% anualmente, em relação à solução existente (em todo o edifício). As necessidades energéticas de aquecimento diminuíram 5,2% e as necessidades de arrefecimento diminuíram 53,1%, na zona do ensino básico – 1º ciclo.

A solução de reabilitação nZEB, consistiu na aplicação de um sistema ETICS com 8 cm de isolamento térmico nas paredes exteriores da zona do ensino básico – 1º ciclo, no aumento do isolamento térmico para 8cm nas paredes exteriores do jardim de infância, no aumento para 15 cm de isolamento na cobertura plana do jardim de infância e para 16 cm na cobertura inclinada do ensino básico – 1º ciclo, a instalação de palas nos vãos orientados a sudeste (do piso 0 e piso 1) e a instalação de 62 painéis solares fotovoltaicos.

Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, a análise das condições ambientais do espaço, sem climatização, no dia mais quente, permitiu verificar que, o edifício apresenta condições de conforto em todas as salas de aulas (duas zonas). No dia mais frio, com climatização, as salas de aulas das duas zonas continuam a não assegurar as condições de desconforto térmico, devido a perdas por radiação para o envidraçado, mas no dia mais quente, as salas de aulas das duas zonas passam a assegurar as condições de conforto térmico.

A solução de reabilitação nZEB permitiu reduzir as necessidades energéticas, 74,0% anualmente, em relação à solução de reabilitação implementada e permitiu reduzir as necessidades energéticas, 75,3% anualmente, em relação à solução existente.

Existe um aumento de custos da solução de reabilitação implementada relativamente à solução de reabilitação para atingir um edifício nZEB de 80,4%, com um período de retorno do investimento adicional de 29 anos. O período de retorno do investimento da solução de reabilitação implementada é de 173 anos, e da solução de reabilitação para atingir um edifício nZEB é de 28 anos.

5.1. Limitações e desenvolvimentos futuros

As limitações deste trabalho estão associadas às opções metodológicas assumidas, no qual se destacam a consideração de um sistema “Ideal Loads” com um coeficiente de desempenho igual a um e um índice de eficiência energética igual a um, para a análise do desempenho do edifício (necessidades energéticas), ou seja, não foi considerado um sistema de climatização “real” para analisar os consumos energéticos do edifício, e a alteração das características dos envidraçados, não foi estudada como uma medida de melhoria, para atingir uma solução de reabilitação nZEB, de forma a melhorar o desempenho térmico do edifício.

Tendo em consideração a análise do trabalho e as limitações anteriormente apresentadas, os desenvolvimentos futuros consistem em estudar mais soluções de reabilitação para atingir um edifício nZEB, como por exemplo, a aplicação de um sistema de climatização “real”, alterar as características dos envidraçados, instalar outras formas de energia renovável e equacionar formas de armazenamento de energia, tornando o edifício mais eficiente ao nível do seu desempenho termo-energético.

REFERÊNCIAS

- ADENE. (2016). 10 Soluções Eficiência Energética - Saiba mais sobre Isolamento de Paredes. Obtido de <https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2017/11/10see-01-isol-paredes-1.pdf>
- ADENE. (2016). 10 Soluções Eficiência energética - Saiba mais sobre janelas eficientes. Obtido de https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2017/11/10see-03_janelas-efic-1.pdf
- ADENE. (2016). 10 Soluções Eficiência Energética - Saiba mais sobre sistemas de ventilação. Obtido de http://www.enerdura.pt/images/stories/Documentos/Guias_ADENE_EE/10see-05-sist-ventilacao.pdf
- ADENE. (2016). 10 Soluções Eficiência Energética - saiba mais sobre Sistemas Solares Fotovoltaicos. Obtido de <https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2017/11/10see-10-sist-fotovoltaico-1.pdf>
- ADENE. (2016). 10 Soluções Eficiência Energética - saiba mais sobre Sistemas Solares Térmicos. Obtido de <https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2017/11/10see-06-sist-st-1.pdf>
- ADENE. (2016). 10 Soluções Eficiência Energética - Saiba mais sobre isolamento de coberturas. Obtido de http://www.enerdura.pt/images/stories/Documentos/Guias_ADENE_EE/10see-02-isol-coberturas.pdf
- Almeida, M. G., Ferreira, M., & Rodrigues, A. (2013). Reabilitação energética do Parque Residencial : metodologia para determinação de soluções de custo ótimo. Revista Materiais de Construção. doi:<http://hdl.handle.net/1822/29086>
- Almeida, R., & Freitas, V. (Novembro de 2015). IEQ assessment of classrooms with an optimized demand controlled ventilation system. p. 6. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.769>
- Almeida, S., Silva, A., Pegas, P., Evtugina, M., Cunha, N., Alves, C., & Pio, C. (Dezembro de 2012). Children exposure to atmospheric particles in indoor of Lisbon primary schools. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.11.052
- Alves, J. (27 de Fevereiro de 2013). Nova estação de caminhos de ferro de aveiro. Obtido de ArchDaily: <https://www.archdaily.com.br/br/01-100095/nova-estacao-de-caminhos-de-ferro-de-aveiro-slash-jlla>
- Amorim, A. (Outubro de 2015). Tese de Dissertação - A Vegetação na Envolvente Exterior dos Edifícios: Impactos, Condicionantes e Estratégias de Intervenção Ecoeficientes. doi:<http://hdl.handle.net/1822/39383>
- APFAC. (2014). Patologias de Sistemas de Isolamento. RELATÓRIO – LFC-IC-282A-2014.
- ASHRAE 55. (2017). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
- ASHRAE STANDARD 62.1. (2007). Ventilation for acceptable indoor air quality.
- Azoia, S. I. (2000). Manual do Vidro.
- Barata, P., Perloiro, P., Ferreira, J., Perloiro, J., & Appleton, P. (2012). Promontorio Recent Projects. ArchiNews 24, 33. Obtido de <http://www.promontorio.net/dropbox/1-ArchiNews24.pdf>

Barbosa, C., & Fontes, M. (Junho de 2016). Jardins verticais: modelos e técnicas. SBU, p. 11. Obtido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191100420X>

Bellver, A. P. (Junho de 2014). Dissertação - Avaliação da Melhoria do Conforto Térmico de uma Casa por Simulação. doi:<http://hdl.handle.net/10183/103763>

Bernardo, J. (2015). Estratégia para a Eficiência Energética nos Edifícios Públicos. Workshop: RePublic_ZEB. DGEG.

Bhatia, A. (2011). Centralized Vs Decentralized Air Conditioning Systems. Obtido de <http://webmail.seedengr.com/Cent%20Vs%20Decent%20AC%20Systems.pdf?fbclid=IwAR3U3ivGsCJ8eVW0JyxxWS2qbf5A9Lpzq5axzJOoQMynAJSLnxJwC6Lnn6k>

BPIE. (2010). Nearly Zero Energy Buildings Definitions Across Europe. Energy. Obtido de http://bpie.eu/uploads/lib/document/attachment/128/BPIE_factsheet_nZEB_definitions_across_Europe.pdf

BPIE. (2011). Principles For Nearly Zero-Energy Buildings. Obtido de BPIE: http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_nZEB-study.pdf

BPIE. (2015). Alleviating fuel poverty in the EU. Obtido de BPIE: <http://bpie.eu/publication/alleviating-fuel-poverty-in-the-eu/>

Carrier. (2009). Bombas de Calor Ar Água. Obtido de carrier: http://www.carrier.pt/files/pdf/xp_energy.pdf

Carvalho, M. F. (2014). Dissertação de Mestrado - Integração de painéis solares térmicos na reabilitação de edifícios em Portugal para AQS e aquecimento ambiente. doi:<http://hdl.handle.net/1822/36204>

CBE Thermal Comfort Tool. (2019). Ferramenta de conforto térmico. Obtido de <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>

CIBSE. (18 de Agosto de 2015). p. 402. Obtido de https://www.buildup.eu/en/practices/publications/cibse-guide-environmental-design-2015?fbclid=IwAR2M_7_ZU7JpouYJxpv8ViM2-Zv4xy1GL0ubMIblsPuEn0Tsvg8723G1_cE

cipagres. (n.d.). Fachadas Ventiladas. Obtido de cipagres: <http://www.cipagres.it/per-professionisti/pareti-ventilate/?lang=es>

cityofpaloalto. (n.d.). Solar Water Heating Systems Types: Advantages and Disadvantages. Obtido de <https://www.cityofpaloalto.org/civicax/filebank/documents/28230>

COM. (2011). 112 final. A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050 - Communication From the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the committee of the regions.

CRRC. (n.d.). Why Cool Roofs Are Way Cool . Obtido de https://coolroofs.org/documents/IndirectBenefitsofCoolRoofs-WhyCRareWayCool_000.pdf

- Cunha, M. (2006). fachada ventilada. Obtido de <https://engenhariacivil.files.wordpress.com/2008/01/dossiereconomico.pdf>
- Danfoss. (n.d.). Bombas de calor. Obtido de Danfoss: <http://refrigerationandairconditioning.danfoss.com.br/applications/heat-pumps/#/>
- DECO. (n.d.). Sistema solar térmico. Obtido de energias-renovaveis-emcasa: https://energias-renovaveis-emcasa.pt/solar_termico/m/artigos/81/download
- Decreto-Lei n.º 118/2013. (2013). (M. d. Emprego, Ed.) Obtido de Diário da República: <http://data.dre.pt/eli/dec-lei/118/2013/08/20/p/dre/pt/html>
- Decreto-Lei n.º 251/2015. (2015). Diário da Republica. Obtido de <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/251/2015/11/25/p/dre/pt/html>
- Decreto-Lei n.º 28/2016. (2016). Diário da República. Obtido de <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/28/2016/06/23/p/dre/pt/html>
- DGEG. (2017). Caracterização Energética Nacional. Obtido de <http://www.dgeg.gov.pt/default.aspx?cn=774977507751AAAAAAAAAAAAA>
- Diogo, A. C. (2012). Dissertação de Mestrado - Sistemas envidraçados com e sem proteção solar. Obtido de <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/ma/dissertacao/2353642401844>
- Directiva 2002/91/CE. (2002). relativa ao desempenho energético dos edifícios. Obtido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0091&from=PT>
- Directiva 2010/31/UE. (2010). Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). Obtido de <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN>
- Diretiva 2012/27/UE. (2012). Parlamento Europeu e do Conselho relativa à eficiência energética. Obtido de <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&from=PT>
- Diretiva 2018/844. (2018). Obtido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/pt/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0844>
- DOW . (n.d.). Isolamento térmico de coberturas planas invertidas. Obtido de Isolar: http://isolar.pt/ficheiros/file/Dow_Portugal_coberturas_invertidas.pdf
- DOW. (n.d.). Isolamento térmico de pavimentos. Obtido de Isolar: http://isolar.pt/ficheiros/file/Dow_Portugal_%20Dow%20PAVIMENTOS.pdf
- ecocasa. (n.d.). Climatização - Sistemas de Climatização. Obtido de ecocasa: https://www.ecocasa.pt/energia_content.php?id=12#solar
- ecotelhado. (n.d.). Brise Vegetal na fachada de prédios reduz consumo de energia. Obtido de ecotelhado: <https://ecotelhado.com/brise-vegetal-na-fachada-de-predios-reduz-consumo-de-energia/>

egreengroup. (n.d.). What is Passive House? Obtido de Equitable GREEN GROUP: <http://www.egreengroup.com/passive-house.html>

EN 15251. (Novembro de 2006). Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.

enat. (n.d.). Geotermia. Obtido de enat: <http://www.enat.pt/geotermia>

Engenharia e Construção. (25 de Julho de 2011). Vantagens e desvantagens das coberturas ajardinadas. Obtido de <https://www.engenhariaeconstrucao.com/2011/07/vantagens-e-desvantagens-das-coberturas.html>

Engenhariacivil.com. (22 de Maio de 2013). Obtido de A integração de turbinas eólicas em fachadas de edifícios: <https://www.engenhariacivil.com/turbinas-eolicas-fachadas-edificios>

EPFAC. (2014). Patologias de Sistemas de Isolamento Térmico pelo Exterior do tipo ETICS. Obtido de <https://www.apfac.pt/patologias/LFC-IC-282A-2014.pdf>

Estanqueiro, A., & Simões, T. (2010). Aproveitamento de energia eólica em ambiente urbano e constituído. *renováveismagazine*, 6.

European Commission. (Outubro de 2013). Employment Effects of selected scenarios from the Energy roadmap 2050. Obtido de https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2013_report_employment_effects_roadmap_2050_1.pdf

European Commission. (n.d.). ZEMedS School Technical & Financial Toolkit nZEB renovation for Mediterranean schools.

Evans, A., Strezov, V., & Evans, T. (25 de Março de 2008). Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 7. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.008>

Ferraz, F. (n.d.). Sistemas de Climatização. Obtido de <https://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/11/sistemas-de-climatizacao5.pdf>

Ferreira, M., Almeida, M., Rodrigues, A., Pires, C., & Vieira, S. (Março de 2015). Reabilitação de edifícios escolares - Níveis ótimos de rentabilidade na reabilitação de edifícios escolares em Portugal. doi:<http://hdl.handle.net/1822/39474>

Fotovoltaico sulweb. (2018). Mini Eolico Domestico: Tanti Vantaggi e Incentivi. Obtido de Fotovoltaico sulweb: <http://www.fotovoltaicosulweb.it/guida/mini-eolico-domestico-tanti-vantaggi-e-incentivi.html>

Freire, S. (2017). Dissertação - Alteração de fonte energética no aquecimento central e produção de AQS numa unidade de cuidados continuados. doi:<http://hdl.handle.net/10451/28331>

Gaspar, H. (junho de 2016). Tese de Dissertação - Melhoria da eficiência energética de edifícios - Análise técnico-económica. doi:<http://hdl.handle.net/10400.26/18284>

- Gauna, J. (2011). Guia del estándar PassivHous - Edificios de consumo energético casi nulo. Obtido de <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-del-Estandar-Passivhaus-fenercom-2011.pdf>
- Gomes, J. (2010). Dissertação de Mestrado - Tecnologias de Construção Associadas aos Sistemas Sustentáveis de Produção de Água Quente e de Climatização em Edifícios - Estado da Arte. Obtido de repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/506/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf
- Gonçalves, H., & Graça, J. (Novembro de 2004). Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal. EGGE, Lisboa. Obtido de <http://www.Ineg.pt/download/4117/Conceitos%20Bioclim%C3%A1ticos.pdf>
- Govaert, M., Knipping, G., Mortejan, Y., Rouard, J.-H., & Squilbin, M. (2014). Implementation of the EPBD in Belgium, Brussels Capital Region. Obtido de <https://www.epbd-ca.eu/outcomes/2011-2015/CA3-2016-National-BELGIUM-Brussels-web.pdf>
- Greener. (16 de Junho de 2016). Telha solar é alternativa para geração de energia. Obtido de <https://www.greener.com.br/telha-fotovoltaica-e-alternativa-para-geracao-de-energia-solar/>
- Guana, J., & Alfonso, J. (2011). Hacia los edificios sin hipoteca energética: Passivhaus – la casa passiva. Guia del estándar Passivhaus, capítulo 1. Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- hildebrandt. (n.d.). CARACTERÍSTICAS Y BENEFICIOS DE LOS MUROS VERDES. Obtido de <http://www.hildebrandt.cl/caracteristicas-y-beneficios-de-los-muros-verdes/>
- idealista. (2016). O futuro chama pelos NZEB, edificios com necessidades energéticas quase nulas. idealista. Obtido de <https://www.idealista.pt/news/decoracao/conselhos/2016/07/25/31172-o-futuro-chama-pelos-nzeb-edificios-com-necessidades-energeticas-quase-nulas>
- inarquia. (2017). 5 Ejemplos de Energia Minieólica en Edificios. Obtido de inarquia: <https://inarquia.es/ejemplos-energia-minieolica-edificios>
- INETI. (Dezembro de 2005). Edifício SOLAR XXI Um edifício energeticamente eficiente em Portugal. p. 11. Obtido de http://repositorio.Ineg.pt/bitstream/10400.9/1321/1/BrochuraSolarXXI_Dezembro2005.pdf
- isover. (n.d.). O que é uma Passive House ou Passivhaus, na sua designação original? Obtido de isover: <https://www.isover.pt/o-que-e-uma-passive-house-ou-passivhaus-na-sua-designacao-original>
- Jaffal, I., Ouldboukhitine, S.-E., & Belarbi, R. (2012). A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. Renewable Energy. Obtido de <http://zavit.org.il/wp-content/uploads/2015/04/Jaffal-et-al.-2011-green-roofs-energy.pdf>
- Jesus, M. P. (2016). Dissertação de Mestrado - Fachadas Verdes e Comportamento Térmico Urbano. doi:<http://hdl.handle.net/1822/48228>
- Kurnitski, J. (2013). Technical definition for nearly zero energy buildings. REVHA. Obtido de https://www.rehva.eu/fileadmin/REHVA_Journal/REHVA_Journal_2013/RJ_issue_3/22-28_nZEB_RJ1303_web.pdf

- Lázaro, D. (2016). Energia Fotovoltaica: Vantagens e Desvantagens. Obtido de Copirisco: <http://www.copirisco.pt/energia-fotovoltaica-vantagens-e-desvantagens/>
- LNEG. (2010). Eficiência Energética nos Edifícios. Obtido de LNEG: <http://energia2020.fc.ul.pt/energia2020/apresentacoes/Helder%20Goncalves.pdf>
- Machado, C., & Miranda, F. (2015). Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. Revista Virtual de Química, 18. Obtido de <http://rvq.sbq.org.br/imagebank/pdf/v7n1a08.pdf>
- Marques, F. (2014). Dissertação de Mestrado - Integração de painéis solares térmicos na reabilitação de edifícios em Portugal para AQS e aquecimento ambiente. doi:<http://hdl.handle.net/1822/36204>
- Marques, J. (julho de 2009). Tese de dissertação - Modelação e controlo de conversor DC/AC para interligação de painéis fotovoltaicos à rede. doi:<http://hdl.handle.net/10216/59728>
- Martins, J., & Couto, J. (2015). Coberturas, Impermeabilizações e Isolamento Térmico e Cofragens. Obtido de https://elearning.uminho.pt/bbcswebdav/pid-650264-dt-content-rid-1269120_1/courses/1617.9107N5_1/TC-ApontPedagTeorica.pdf
- Mascarenhas, J. (2003). Materiais Básicos (2ª parte): Materiais Ferrosos e Alumínio.
- Matias, L. M. (2010). Tese de Doutoramento - Desenvolvimento de um modelo adaptativo para definição das condições de conforto térmico em Portugal. (LNEC, Ed.)
- McKendry, P. (6 de Julho de 2001). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. p. 10. doi:[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
- Medeiros, H. (1 de setembro de 2009). Energia solar térmica. Obtido de Arcoweb: <https://www.arcoweb.com.br/finestra/tecnologia/paineis-de-aquecimento-de-agua-nas-fachadas-01-09-2009>
- Mendes, F. (Fevereiro de 2009). Tese de Dissertação - Durabilidade das Fachadas Ventiladas. Obtido de <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/61566/1/000147488.pdf>
- Mexa, N. (2011). Dissertação de Mestrado - Sistemas Solares Térmicos - Simulação de perfis de consumo e cálculo do comportamento térmico a longo prazo. doi:<http://hdl.handle.net/10451/8772>
- Natural Works. (25 de Abril de 2014). DesignBuilder Software. Obtido de <http://www.natural-works.com>
- Oliveira, D., & Martins, J. (31 de julho de 2014). Dissertação - Metodologia para análise e escolha de Sistemas de Condicionamento de Ar. Obtido de http://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2014-1_danilo_e_juliana-1.pdf
- Paiva, J. A. (2006). Guia Técnico de Reabilitação Habitacional (Vol. II).
- Palhinha, M. S. (2009). Dissertação de Mestrado - Sistemas de sombreamento em arquitetura: proposta de um novo método de concepção e dimensionamento. Obtido de <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395138397223/Dissertacao.pdf>

Pinho, V. (Julho de 2013). Dissertação de Mestrado - Caracterização Térmica de Vãos Envidraçados e Respectivas Proteções Solares. doi:<http://hdl.handle.net/10216/72689>

Poirazis, H., Blomsterberg, A., & Wall, M. (2006). Energy simulations for glazed office buildings in Sweden. ScienceDirect. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.10.011>

Pope, K., Dincer, I., & Naterer, G. (25 de Março de 2010). Renewable Energy. Energy and exergy efficiency comparison of horizontal and vertical axiswind turbines, p. 12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.02.013>

Portal da Construção Sustentável. (n.d). Energia. Obtido de csustentavel: <http://www.csustentavel.com/energia/>

Portal da Construção Sustentável. (n.d). Turbina Eolica. Obtido de Portal da Construção Sustentável: <http://www.csustentavel.com/glossary/turbina-eolica/>

Portal das energias renováveis. (2015). Fontes de energia renováveis e não renováveis. Obtido de Portal das energias renováveis.

Portal das energias renováveis. (2016). Energia geotérmica. Obtido de Portal das energias renováveis: <https://www.portal-energia.com/energia-geotermica-calor-da-terra/>

Portal das Energias Renováveis. (2018). Biomassa. Obtido de Portal das Energias Renováveis: http://energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=1&ID_area=2&ID_sub_area=2

Portal das Energias Renováveis. (2018). Eólica. Obtido de Portal das Energias Renováveis: http://energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=63&ID_area=3&ID_sub_area=6

Portal Energia. (2016). Vantagens e desvantagens da energia a biomassa. Obtido de Portal Energia: <https://www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-energia-biomassa/>

Portal Energia. (2017). Principais tipos de células fotovoltaicas constituintes de painéis solares. Obtido de Portal Energia: <https://www.portal-energia.com/principais-tipos-de-celulas-fotovoltaicas-constituintes-de-paineis-solares/>

Portaria n.º 353-A. (4 de Dezembro de 2013). Diário da República, 1.ª série — N.º 235. Ministérios do Ambiente, Orçamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.

Portaria n.º 42/2019. (30 de Janeiro de 2019). Trabalho, Solidariedade e Segurança Social e Ambiente e Transição Energética.

Portaria n.º 98/2019. (2 de Abril de 2019). Ambiente e Transição Energética.

quaibranly. (n.d.). The Living Wall of Greenery. Obtido de <http://www.quaibranly.fr/en/public-areas/the-living-wall-of-greenery/>

Ribeiro, D. (2016). Fachadas Verdes: uma solução sustentável. Obtido de superfluonecessario: <http://superfluonecessario.com.br/fachadas-verdes-uma-solucao-sustentavel/>

- Ribeiro, V. (Janeiro de 2014). Dissertação de Mestrado - Dimensionamento de Instalações Solares Térmicas em Edifícios - Projeto e análise de viabilidade económica. doi:<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/71478>
- Rio, J. (Julho de 2011). Tese de Dissertação - Geometria e Implicações nas Tecnologias da Construção - Estudo de Casos. doi:<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/63378>
- RNAE. (2014). Climatização eficiente. Obtido de enerdura: http://www.enerdura.pt/images/stories/Documentos/Eficiencia_Energetica_Setor_Empresarial/Climatizacao_Eficiente_low.pdf
- Rocha, J. (Julho de 2008). Tese de Dissertação - Reabilitação do Ponto de Vista Térmico de Coberturas Inclinadas, no Centro Histórico do Porto. doi:<http://hdl.handle.net/10216/58536>
- Safaei, F., Kosasih, B., kwok, K., & Jafari, S. (2015). Power generation analysis of PowerWindow, a linear wind generator, using computational fluid dynamic simulations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 13. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.10.006>
- Salvador, J. (2017). Dissertação de Mestrado - Plano de Ação para a Energia Sustentável do Município de Loures: Análise de progressos. doi:<http://hdl.handle.net/10451/32756>
- Sanches, A. d. (Junho de 2014). Projeto Educativo 2013-2017. Obtido de ae franciscosanches: http://www.aefranciscosanches.pt/2016_147_projeto_educativo_2013-17.pdf
- Santorini, I., Assunta, N., & Karsten, V. (2012). Net zero energy buildings: A consistent definition framework. *Energy and Buildings*. Obtido de <http://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/DA-TP6-Sartori-2012-02.pdf>
- Santos, C. (2007). Evolução das Soluções de Paredes Face a novas . Paredes de Alvenaria. Obtido de http://www.hms.civil.uminho.pt/events/alvenaria_2007/041_064.pdf
- Santos, P. (Fevereiro de 2017). Dissertação de Mestrado - NZEB: Nearly Zero Energy Building Metodologias para Implementação NZEB Aplicação a Edifício Unifamiliar Novo. doi:<http://hdl.handle.net/10400.26/18518>
- Sartori, I., Napolitano, A., & Voss, K. (28 de Janeiro de 2012). *Energy and Buildings*. Net zero energy buildings: A consistent definition framework, p. 13. Obtido de <http://www.task20.m.iea-shc.org/data/sites/1/publications/DA-TP6-Sartori-2012-02.pdf>
- Segreti, J. B., & Bito, N. S. (2006). Crédito Carbono: Um Estudo de Caso da Empresa NovaGerar. Obtido de <http://www.redalyc.org/html/947/94782109/>
- Silva, D. (Outubro de 2014). Dissertação de Mestrado - Simulação térmica multizona de um centro social no âmbito do RSECE: Análise de várias soluções AVAC. doi:<http://hdl.handle.net/1822/34354>
- Silva, E., Camargo, J., Sordi, A., & Santos, A. (1 de novembro de 2003). *MultiCiência*. O futuro dos recursos: recursos energéticos, meio ambiente e desenvolvimento.

- Silva, J. (Dezembro de 2012). Tese de Dissertação - Reabilitação térmica de edifícios residenciais: propostas de intervenção. Obtido de <http://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/2163/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>
- Skkits. (2017). Vidros de controle solar. Obtido de skkits: <http://blog.skkits.com.br/index.php/2017/01/06/vidros-de-controle-solar/>
- Solar Project. (2018). Solar Fotovoltaica. Obtido de Solar Project: http://www.solarproject.pt/?page_id=35#content-tab-1-1-tab
- Sousa, J. (Janeiro de 2018). O paradigma da eficiência energética dos edifícios. 36-37. ENGenharia Revista da Ordem dos Engenheiros Técnicos. Obtido de Edifícios e Energia: <https://www.oet.pt/downloads/Revista/ENGenharia12.pdf>
- SustentArqui. (16 de Setembro de 2014). Integração da energia solar elétrica na arquitetura . Obtido de <https://sustentarqui.com.br/construcao/integracao-da-energia-solar-eletrica-na-arquitetura/>
- Thomaz, B., & Ishioka, L. (2011). Materiais de construção - Isolamento térmico. Obtido de https://ciamh.up.pt/arma/wp-content/uploads/2014/08/G19_isolamento-termico.pdf
- Tilley, D., Price, J., Matt, S., & Marrow, B. (2012). Vegetated Walls: Thermal and Growth Properties of Structured. Obtido de <https://greenscreen.com/docs/Research/FinalReportVegetatedWallsThermalGrowthGreenFacades.pdf>
- Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., & Crawley, D. (2006). Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. National Renewable Energy Laboratory. Obtido de <https://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>
- Vargas, M. (18 de março de 2011). Primeiro edifício alimentado só a energia solar térmica. Obtido de INGENET bitácora: <http://bitacora.ingenet.com.mx/2011/03/primer-edificio-calentado-solo-con-energia-solar-termica/>
- Vaz, A., Ferreira, D., Luso, E., & Fernandes, S. (2013). Manual para a conservação e reabilitação da diversidade bioconstrutiva. Câmara Municipal de Bragança. doi:<http://hdl.handle.net/10198/9090>
- ventilaqua. (n.d). Sistemas de Biomassa. Obtido de ventilaqua: <http://www.ventilaqua.com/PT/red/pag/biomassa>
- Voitille, N. (12 de Julho de 2012). Telhados Brancos ou Cool Roofs. Obtido de <http://www.cliquearquitectura.com.br/artigo/telhados-brancos-ou-cool-roofs.html>
- Wargocki, P., Porras-Salazar, J., & Contreras-Espinoza, S. (15 de Junho de 2019). Building and Environment. p. 8. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.046>

ANEXOS



